

# Charakterisierung von Strukturen im Strömungsfeld gemessen mit einem Acoustic Doppler Current Profiler

(Von der Hafencity Universität Hamburg als Kenntnisstandprüfung zur Promotionszulassung angenommene Arbeit)

M. C. Cysewski



# **Charakterisierung von Strukturen im Strömungsfeld gemessen mit einem Acoustic Doppler Current Profiler**

(Von der HafenCity Universität Hamburg als Kenntnisstandprüfung zur Promotionszulassung angenommene Arbeit)

**M. C. Cysewski**

---

Die HZG Reporte werden kostenlos abgegeben.  
HZG Reports are available free of charge.

Anforderungen/Requests:

Helmholtz-Zentrum Geesthacht  
Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH  
Bibliothek/Library  
Max-Planck-Straße 1  
21502 Geesthacht  
Germany  
Fax.: +49 4152 87-1717

*Druck: HZG-Hausdruckerei*

Als Manuskript vervielfältigt.  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor.

ISSN 2191-7833

Helmholtz-Zentrum Geesthacht  
Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH  
Max-Planck-Straße 1  
21502 Geesthacht  
[www.hzg.de](http://www.hzg.de)

## Charakterisierung von Strukturen im Strömungsfeld gemessen mit einem Acoustic Doppler Current Profiler

*(Von der HafenCity Universität Hamburg als Kenntnisstandprüfung zur Promotionszulassung angenommene Arbeit)*

Marius Christoph Cysewski

*155 Seiten mit 83 Abbildungen und 10 Tabellen*

### Zusammenfassung

Der Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) ist seit über zwei Jahrzehnten ein Standardsensor zur Vermessung von Strömungen in Gewässern und hat eine Reife erreicht, sodass seine Ergebnisse häufig als Referenzwerte zur Validierung bzw. Kalibrierung von anderen Strömungssystemen benutzt werden. Die Durchsicht der gemessenen ADCP-Daten in verschiedenen Messgebieten zu unterschiedlichen Tidezeiten sowie Wind-Seeangssituationen, zeigen die Notwendigkeit die Strömungsdaten auf ihre Qualität zu prüfen und einige Korrekturen anzubringen. Zur Qualitätsprüfung wurde der Einfluss der Referenzwahl (GPS oder Bottom Track) für die Bewegung des Sensors über Grund, des Geräteeinbaufehlers sowie des ungenauen Salzgehaltes auf die gemessene Strömung untersucht. Die Analyse von Artefakten im Strömungsfeld wurde durchgeführt und eine zusätzliche Bereinigung der Messdaten und Korrekturen ist entwickelt worden. Artefakte, die nichts mit der natürlichen Hydrodynamik in den Messgebieten zu tun haben, treten bei bestimmten Kombinationen von Messbedingungen und Messverfahren auf, können aber die gleichen Größenordnungen wie reale Strömungswerte erreichen. Durch den Einbau des ADCP's im Schiffsboden (Schwingereintauchtiefe bis zu 4 m) wird eine Extrapolation zur Wasseroberfläche hin notwendig. Zwei ausgesuchte und bereinigte vertikale Profile wurden anschließend mit verschiedenen Algorithmen parametrisiert um die beste Methode für die Extrapolation der Strömung bis zur Wasseroberfläche zu bestimmen. Durch eine Simulation von verschiedenen Schwingereintauchtiefen konnten erste Kriterien genannt werden, die es erlauben bei bestimmten Bedingung den geeigneten Algorithmus zu finden. Die Definition des Bedarfs an weiteren Kriterien für zuverlässige Parametrisierung und Extrapolation sowie die Notwendigkeit der häufigeren Salz-Temperaturmessungen und des Moving Bed Tests schließen die Arbeit ab.

## Characterization of structures in the current field measured with an Acoustic Doppler Current Profiler

### Abstract

Over last twenty years the Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) has become standard instrument for current measurements and is often used for validation or calibration of other current measuring systems. During the post-processing of ADCP data acquired in different regions, tidal cycles, wind and sea conditions turned out the need of double checking of the data quality and put some corrections. The analysis of the data quality is headed by a comparison of three different references GPS-VTG, GPS-GGA and the bottom tracking. The impact of misalignment and incorrect sound speeds to the data is estimated. Some artifacts appear in combination of system configuration and sea conditions and have values like characteristic currents or hydrodynamic effects in the nature.

---

Additional post processing programs for data cleansing and correction is implemented. Due to the transducer depth (2 to 4 meters) of vessel mount ADCP an extrapolation of current up to the water surface becomes necessary. Two cleansed and corrected data sets are parameterized by means of different algorithms to find the best method for the extrapolation. Simulation of different transducer depths carried out a few criteria how to identify the best parameterization in given current conditions. The need of additional criteria for parameterization and extrapolation in different hydrodynamic situations is specified as well the need of frequently sound speed measurements and moving bed tests.

*Manuscript received / Manuskripteingang in TFP: 7. Dezember 2011*

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
Verzeichnis der Abbildungen.....	IV
Verzeichnis der Tabellen.....	IX
Liste der Symbole.....	X
Glossar.....	XII
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Allgemeines .....	1
1.2 Problemstellung .....	2
1.3 Aufbau der Arbeit .....	3
<b>2 Grundlagen ADCP</b> .....	<b>5</b>
2.1 Schallausbreitung im Wasser.....	5
2.2 Phasenmessung .....	7
2.3 Dreidimensionale Strömungsbestimmung .....	8
2.4 Fehlereinflüsse, Kompensationen und Bezugssysteme beim Schiffseinsatz .....	11
2.5 Echointensität und Reichweiten.....	12
2.6 Schallgeschwindigkeit .....	13
2.7 Änderungen der Schallgeschwindigkeit mit der Tiefe.....	14
2.8 Schichtungen im Wasser.....	15
2.9 Nebenkeulen .....	15
2.10 Hard- und Software - Marktübersicht.....	16
<b>3 Experimenten- und Datenbeschreibung</b> .....	<b>20</b>
3.1 Messgebiete und Datensätze .....	21
3.1.1 Messgebiet 1: Lister Tief .....	22
3.1.2 Messgebiet 2: Deutsche Bucht.....	27
3.1.3 Messgebiet 3: Elbmündung .....	30
3.2 Trägerplattformen und Sensoraufstellung.....	31
3.3 GPS-Navigation .....	33
3.3.1 GPS-Grundlagen.....	33
3.3.2 Spezifikationen von Ashtech und Javad .....	36
3.3.2 GPS-Datentelegramme .....	38
3.4 ADCP-Datennahme .....	38
<b>4 Datenqualität und Korrekturen</b> .....	<b>40</b>
4.1 WinRiver Playback.....	40
4.1.1 Korrekturen des ADCP-Einbaufehlers und der Schallgeschwindigkeit .....	42
4.1.2 Referenzen: Bottom-Track, GPS-GGA und GPS-VTG .....	44
4.2. Referenzenvergleich .....	48
4.2.1 Strömungsmessung .....	48
4.2.2 Tiefenbestimmung .....	52
4.2.3 Plattformbewegung .....	54
4.2.4 Hub aus GPS.....	63
4.2.5 Fazit des Referenzenvergleichs .....	67
4.3 Zeitstempelfehler .....	72

4.4	Positionsoffsets und Koordinatentransformation.....	72
4.5	Beseitigung defekter Headings und Kurvenfahrten.....	75
4.6	Weitere Datenfilterung .....	76
<b>5</b>	<b>Datenanalyse.....</b>	<b>77</b>
5.1	Homogenität und Stationarität.....	78
5.2	Parametrisierung der Datensätze.....	80
5.3	Fazit der Parametrisierung.....	90
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>93</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>97</b>
<b>Anhang A</b>	<b>Bilder der ADCP Trägerplattformen.....</b>	<b>102</b>
A1	FS-Heincke .....	102
A2	FS-Prandtl .....	103
A3	Schlauchboot „Onkel Herbert“ .....	104
<b>Anhang B</b>	<b>GPS Datentelegramme .....</b>	<b>105</b>
B1	GGA.....	105
B2	VTG .....	105
B3	ZDA .....	106
B4	HDT .....	106
B5	HRP.....	106
<b>Anhang C</b>	<b>ADCP Datenbeispiel und Formatspezifikationen.....</b>	<b>107</b>
C1	RDI classic ASCII-Output Beispiel.....	108
C2	RDI classic ASCII-Output Datenformat.....	109
<b>Anhang D</b>	<b>ADCP Profile.....</b>	<b>110</b>
D1	Prandtlprofil 010 vom 12.05.2006 während der Flutphase im Messgebiet Königshafen/Lister Tief.....	111
D2	Schlauchbootprofil 003 vom 22.05.2007 während der Ebbphase im Messgebiet Lister Tief .....	115
D3	Prandtlprofil 178 vom 23.05.2007 während der Ebbphase Messgebiet Lister Tief .....	118
D4	Heinckeprofil 021 vom 09.09.2008 aus dem Messgebiet 2 westlich vor Helgoland.....	121
D5	Heinckeprofil 140 vom 23.09.2009 aus dem Messgebiet 2 zwischen Helgoland und der Wesermündung.....	124
D6	Prandtlprofil 041 vom 06.06.2010 erhoben im Messgebiet 3 der Elbmündung .....	127
<b>Anhang E</b>	<b>Schallgeschwindigkeitstabelle .....</b>	<b>128</b>
<b>Anhang F</b>	<b>CTD-Messung.....</b>	<b>129</b>
F1	CTD-Messung aus dem Messgebiet Lister Tief vom 16.07.2002 .....	129
F2	CTD-Messung in der Elbe bei Cuxhaven vom 14.06.2010 .....	132

<b>Anhang G</b>	<b>Radarströmungskarten .....</b>	<b>134</b>
<b>Anhang H</b>	<b>Emailverkehr</b>	
H1	BFG.....	136
H2	Sontek .....	137
H3	RDI .....	138
<b>Anlage 1</b>	<b>CD-ROM</b>	
1	Quellcode des PV-WAVE Prototyps	
2	ADCP-Datensätze	
3	CTD-Datensätze	
4	GPS-Messdaten statischer Test	

## Verzeichnis der Abbildungen

2.1	Bestimmung der radialen Geschwindigkeiten über die Phasenmessung .....	7
2.2	RDI ADCP vom Typ Monitor mit vier Schwingern.....	8
2.3	Messprinzip der ADCP Strömungsmessung vom Schiff aus .....	9
2.4	Tiefenabhängige Veränderung der Schallausbreitung .....	14
2.5	Schematische Darstellung der Haupt- und Nebenkeulen der ADCP-Schwinger.....	16
3.1	Lage der drei Messgebiete in der Nordsee.....	20
3.2	Flutsituation in der Deutschen Bucht (GETM 3D Modellausgabe) .....	21
3.3a	Digitales Geländemodell des Tidekanals Lister Tief .....	22
3.3b	Lage des Profils 178 vom 23.05.2007 im Messgebiet 1 Lister Tief .....	22
3.4	Konvergenz und Divergenzzonen der Strömung über Sandwellen .....	23
3.5a	Betrag der horizontalen Strömung als vertikaler ADCP-Schnitt durch die Wassersäule .....	23
3.5b	Vertikale Strömungskomponenten. Unterschiedliche Messergebnisse bei der Verwendung von unterschiedlichen Referenzen Bottom-Track und GPS-VTG .....	25
3.6	Vertikale Strömungskomponenten referenziert über BTM aus einem Schlauchboot-ADCP-Profil im Messgebiet 1 Lister Tief.....	26
3.7	Horizontale Strömungskomponenten aus dem Profil westlich vor Helgoland .....	27
3.8	Horizontaler Betrag und die vertikale Strömungskomponente aus dem Datensatz zwischen Helgoland und der Wesermündung. Referenziert über Bottom Track.....	28
3.9	Horizontaler Betrag, die vertikale Strömungskomponente sowie Roll- und Stampfwinkel aus dem Profil zwischen Helgoland und der Wesermündung. Referenziert über GPS-GGA .....	29
3.10	Horizontaler Betrag (oben) und horizontale Richtung (unten) der Strömungs- komponenten aus dem Datensatz in der Elbmündung .....	30
3.11	Schematische Darstellung der Positionsoffsets des ADCP's relativ zur GPS-Antennen .....	31
3.12	Positionsbestimmung eines Neupunktes mit GPS .....	33

3.13	Genauigkeiten der Lagewinkel des Bewegungssensors Javad Gyro-4T in Abhängigkeit von der Länge der Basislinien.....	37
3.14	Flussdiagramm der Datennahme mit der Software WinRiver 1.06.....	39
4.1	Schematische Darstellung der ADCP-Postprozessierung.....	41
4.2	Unterschiede in der Wegermittlung bei Benutzung des Bottom Tracks und der GPS-Position.....	42
4.3	Differenzen zwischen dem Bottom-Track (rot) und der GPS-GGA (blau), die offensichtlich aus der falschen Schallgeschwindigkeit resultieren.....	43
4.4	Wege über Grund aus dem Bottom Track und der GPS-Positionsreferenz nach der empirischen Korrektur des Beam 3 Einbaufehlers und der Schallgeschwindigkeitskorrektur .....	44
4.5	Scheinbare Bewegung der ADCP-Plattform (flussaufwärts) während einer stationären Moving-Bed Testmessung.....	45
4.6	Scheinbarer räumlicher Versatz am Ende der Moving-Bed Testmessung bei der Schleifenmethode .....	47
4.7	Lage des Vergleichsprofils 010 vom 12.05.2006 mit Strömungsvektoren aus dem Tiefenlayer 2,3 m.....	49
4.8	Einfluss verschiedener Einstellungen auf die Messwerte des Profils 010.....	50
4.9	Tiefendifferenzen der vier ADCP-Schwinger zum Mittelwert.....	52
4.10	Vergleich der Detailauflösungen und der Tiefenunterschiede zwischen einem Vermessungsecholot und der mittleren Tiefe aus dem ADCP .....	54
4.11	Gegenüberstellung der Unterschiede (roter Kasten) in der vertikalen Strömungskomponente, die ausschließlich durch die Wahl verschiedener Referenzen entstehen: oben GPS-VTG, unten BTM.....	55
4.12	Schiffskurs, Rollen und Stampfen der Ludwig Prandtl während der Profilmessung 178.....	56
4.13	Einfluss des Hubs auf die ADCP-Messung Profilmessung 178.....	57
4.14	Differenz des horizontalen Betrages zwischen Bottom Track und GPS-VTG in 5 m Tiefe.....	58

4.15	Unterschiedliche Messergebnisse des horizontalen Betrages der Strömung, die durch die Verwendung verschiedener Referenzen BTM, GPS-GGA und GPS-VTG unter Einfluss von Roll, Pitch und Hub bei einer Seegangssituation.....	60
4.16	Unterschiedliche Messergebnisse der vertikalen Strömungskomponente, die durch die Verwendung verschiedener Referenzen BTM, GPS-GGA und GPS-VTG unter Einfluss von Roll, Pitch und Hub bei einer Seegangssituation entstehen.....	61
4.17	Unterschiedliche Messergebnisse bei der Bestimmung der Schiffsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Referenz BTM, GPS-GGA und GPS-VTG. Die Neigung der Plattform (Roll und Pitch) erfasst durch den ADCP-Sensor .....	62
4.18	Zeitserie der RTK-GPS-Höhen während einer stationären Messung .....	64
4.19	Satellitenanzahl (schwarze Linie) und der HDOP-Wert (in blau) der stationären RTK-GPS-Höhenbestimmung .....	64
4.20	Häufigkeitsverteilung der RTK-Höhendifferenzen (Max -Min) innerhalb eines Ensembles mit der Dauer von 6 Sekunden .....	64
4.21	Zeitserie der GPS-Höhen während einer stationären Messung ohne GPS-Korrekturen .....	65
4.22	Satellitenanzahl (schwarze Linie) und der HDOP-Wert (in blau) während der GPS-Höhenbestimmung ohne GPS-Korrekturen .....	66
4.23	Differenzen (Maximum - Minimum) in den Höhen innerhalb von Ensembles (Dauer je 6 Sekunden) bei der stationären GPS Stand Alone Messung .....	66
4.24	Bewegung des Schlauchbootes beim Profil 003 vom 22.05.2007 im Lister Tief.....	68
4.25	Ergebnis der empirischen Ermittlung des Beam 3 Einbaufehlers und der Schallgeschwindigkeit beim Überqueren der Elbe .....	69
4.26	GPS-Koordinatentransformation in das Koordinatensystem Gauss-Krüger.....	73
5.1	Horizontale Beträge und Richtungen aus der Strömungsmessung in der Tiefe 2,5 m sowie die mittlere Wassertiefe am Ende des Profils 178 im Lister Tief.....	79
5.2	Testdatensatz für die Suche nach der besten Parametrisierung und Validation der extrapolierten Strömungswerte. Schlauchbootmessung im Lister Tief .....	81
5.3	Extrapolationsmethoden verwendet in der Software WinRiver .....	82
5.4	Parametrisierungen eines Strömungsprofils erhoben mit einem am Gewässerboden montierten ADCP .....	83

5.5	Vergleich der horizontalen Beträge zweier Vertikalprofile aus dem Messgebiet Lister Tief, die 20m bzw. 9 Sekunden auseinander liegen .....	84
5.6	Ergebnisvergleich der Parametrisierungen der Strömungskomponenten Ost-West und Nord-Süd zweier Vertikalprofile aus dem Messgebiet Lister Tief mit ausgeblendeten oberen 2,3 m .....	86
5.7	Ergebnisvergleich der Parametrisierungen der Strömungskomponenten Ost-West und Nord-Süd zweier Vertikalprofile aus dem Messgebiet Lister Tief mit ausgeblendeten oberen 5,0 m .....	89
5.8	Ergebnis einer logarithmischen Parametrisierung des Strömungsbetrages in der Hauptströmungsrichtung angewandt auf eine stationäre Messung in dem Gezeitenkanal Cordova bei Vancouver (Canada) .....	91
5.9	Horizontaler Betrag der Strömung aus dem Profil 021 vom 09.09.2008 erhoben westlich vor Helgoland .....	92
A1	Forschungsschiff „Heinke“ .....	102
A2	Forschungsschiff „Ludwig Prandtl“ .....	103
A3	Schlauchboot „Onkel Herbert“ .....	104
D1 a-c	Horizontaler Betrag , horizontale Richtung sowie die vertikale Komponente der Strömung im Messgebiet 1 Königshafen/Lister Tief. Profilnr. 010 vom 12.05.2006. ....	111
D1 d-f	Error-velocity, Intensität sowie Stampf und Rollwinkel aus dem Profil 010 vom 12.05.2006. ....	112
D1 g-i	Schiffskurs, Schiffsgeschwindigkeit sowie mittlere Geschwindigkeit der Strömung aus dem Profilnr. 010 vom 12.05.2006. ....	113
D1 j	GPS-Höhe gemittelt auf Ensemble während des Profils 010 vom 12.05.2006 .....	114
D1 k	GPS-Qualitätsindex gemittelt während des Profils 010 vom 12.05.2006. ....	114
D2 a-c	Gemittelte Strömungsvektoren, horizontaler Betrag sowie horizontale Richtung aus Profilnr. 010 vom 22.05.2007.....	115
D2 d-f	Vertikale Strömungskomponente referenziert über GPS-GGA und BTM sowie der Schiffskurs während der Profilnr. 010 vom 22.05.2007.....	116
D2 g-h	Roll und Stampfwinkel sowie Error-velocity während der Profilnr. 010 vom 22.05.2007 .....	117

D3 a-c	Gemittelte Strömungsvektoren , horizontaler Betrag sowie horizontale Richtung aus Messgebiet 1 Lister Tief. Profilnr. 178 vom 23.05.2007. ....	118
D3 d-f	Vertikale Strömungskomponente und die Error-Velocity aus Messgebiet 1 Lister Tief. Profilnr. 178 vom 23.05.2007. ....	119
D3 g-i	Roll und Stampfwinkel, Schiffsgeschwindigkeit und -kurs aus Messgebiet 1 Lister Tief. Profilnr. 178 vom 23.05.2007. ....	120
D4 a-c	Horizontaler Betrag sowie horizontale Richtung und die vertikale Strömungskomponente aus Messgebiet 2 westlich vor Helgoland. Profilnr. 021 vom 09.09.2008. ....	121
D4 d-f	Error-velocity, Echointensität und gemittelte Strömung aus dem Messgebiet 2 westlich vor Helgoland. Profilnr. 021 vom 09.09.2008. ....	122
D4 g-i	Roll und Stampfwinkel, Comboshiptrack, gemittelte Strömung aus dem Profilnr. 021 vom 09.09.2008. ....	123
D5 a-c	Gemittelte Strömung referenziert über GPS-VTG, GPS-GGA und BTM aus dem Messgebiet 2 zwischen Helgoland und Wesermündung Profilnr. 140 vom 23.09.2009. ....	124
D5 d-f	Schiffsgeschwindigkeiten ermittelt aus GPS-VTG, GPS-GGA und BTM aus dem Profilnr. 140 vom 23.09.2009. ....	125
D5 g-h	Schiffskurs sowie Roll und Stampfwinkel während der Profilfahrt 140 vom 23.09.2009 .....	126
D6	Lage des Prandtlprofils 041 vom 06.06.2010 erhoben im Messgebiet 3 der Elbmündung.....	127
F1	Lage der CTD-Profile Cuxhaven am 14.06.2010 (BAW-Hamburg) .....	132
F2	Wasserstand für das Messgebiet vor Cuxhaven am 14.06.2010 (BAW-Hamburg) .....	132
F3	Salzgehalte zu verschiedenen Tidezeiten für das das Messgebiet vor Cuxhaven am 14.06.2010 (BAW-Hamburg) .....	133
G1	Betrag der Oberflächenströmung erfasst mit RDCP im Messgebiet Lister Tief .....	134
G2	Windkalibrierungsmessung (radiale Strömungskomponente) aus dem Messgebiet Lister Tief .....	134
G4	Radiale Strömungskomponente in der Deutschen Bucht erfasst durch die HF-Radarstation Wangerooge .....	135

## Verzeichnis der Tabellen

1.1	Zusammenstellung ausgewählter technischer Details zu den häufigsten ADCP-Typen.....	10
1.2	Übersicht der Messmodi in Abhängigkeit der Strömungsverhältnisse im Messgebiet.....	10
3.1	Positionsoffsets der GPS-Masterantenne relativ zu ADCP-Schwinger bei verschiedenen Einsätzen .....	32
3.2	Datenausgabefrequenz in Hz der NMEA-Protokolle beider GPS-Geräte, Kombination von ADCP-Typen mit GPS-Geräten in Abhängigkeit der Messkampagne .....	32
3.3	Korrekturmodi des GPS-Signals und die Lagegenauigkeiten beim Ashtech Aquarius-22 .....	34
4.1	Ergebnisse einer vertikalen CTD-Messung im Lister Tief.....	48
4.2	Meridiankonvergenzen für alle wichtigsten Messgebiete.....	74
5.1	Ergebnisse der Parametrisierungen der Wassersäule mit ausgeblendeten oberen 2,3 m.....	87
5.2	Ergebnisse der Parametrisierungen der Wassersäule mit ausgeblendeten oberen 5,0 m.....	88
5.3	Ergebnisse der Validation der linearen Extrapolation über den Tiefenbereich 5 m bis zur Wasseroberfläche nach einer Approximation über den Tiefenbereich 15 m bis 5 m .....	90

## Liste der Symbole

### Lateinisches Alphabet

$a$	Absorbtionskoeffizient
$a'$	unbekannte
$A$	Richtung aus dem GPS-Kompass (Heading)
$a_e$	grosse Halbachse des Ellipsoides
$b$	Exponent 1/6
$b_e$	kleine Halbachse des Ellipsoides
$c$	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwellen im Wasser
$c_g$	ebene Gaußsche Meridiankonvergenz
$D$	Tiefe in Metern
$EI$	Echointensität
$e$	1. numerische Exzentrizität
$f$	Frequenz der Ultraschallwellen
$f_d$	Frequenzverschiebung durch den Dopplereffekt
$f_s$	Frequenz der gesendeten Ultraschallwelle
$s$	Strecke zwischen dem Echolot und dem Reflektor (Meeresboden)
$l$	Entfernung vom Hauptmeridian
$Q_{mbt}$	Geschwindigkeitsquotient
$R$	Entfernung vom Schwinger
$R_{max}$	maximale Reichweite
$S$	Salzgehalt
$SL$	Sendeleistung
$St$	scheinbar zurückgelegte Strecke
$SV$	Volumenbezogene Rückstreuung
$t$	Zeit
$T$	Wassertemperatur
$Tt$	Dauer des Tests
$t_R$	Richtungswinkel zwischen GPS-Masterantenne und dem ADCP bezogen auf Gitternord
$u$	horizontaler Betrag der Strömung
$v$	relative Geschwindigkeit zwischen Sender und Reflektor
$V$	Betrag der Strömung
$V_i$	horizontaler Betrag der Strömung (Strömungsstärke)
$V_x$	Ost-West-Komponente der Strömung
$V_y$	Nord-Süd-Komponente der Strömung
$V_z$	Vertikal-Komponente der Strömung
$V_{err}$	Fehler vom Betrage der Strömung
$V_m$	mittlere Fließgeschwindigkeit des Wassers
$V_{mb}$	Geschwindigkeit des Sediments
$z_b$	Tiefe vom Gewässerboden aus
$z$	Tiefe von der Wasseroberfläche aus

## Griechisches Alphabet

$\alpha$	Winkel zwischen der Strömungsrichtung und der Ultraschallwellenrichtung gesendet durch den Schwinger
$\delta$	Richtungsoffset berechnet aus den orthogonalen Offsets in den Positionen zwischen GPS-Masterantenne und ADCP-Aufbauorten
$\theta$	Winkel der Hauptkeule zur Lotrechten
$\lambda$	Länge einer Ultraschallwelle (Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Wellenbergen)
$\lambda_e$	ellipsoidische Länge
$\lambda_0$	Hauptmeridian des GK-Streifens
$\rho$	Umrechnungskonstante ( $180^\circ/\text{Pi}$ )
$\sigma_p$	Genauigkeit der Positionsbestimmung
$\sigma_r$	Genauigkeit der Pseudostreckenmessung
$\sigma_{\text{Heading}}$	Genauigkeit der Kursbestimmung
$\sigma_{\text{Roll/Pitch}}$	Genauigkeit der Stampf- und Rollwinkelbestimmung
$\varphi_e$	ellipsoidische Breite
$\Theta$	Kreiselkompassfehler

## Glossar

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler Strömungsmessgerät
Advektion	Räumlicher Versatz von Strömungskanten in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit, dem Gradienten in der Bathymetrie sowie des Wasserstandes
AWI	Alfred-Wegener-Institut
BFG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BTM	Bottom Tracking Mode, Methode zur Bestimmung der ADCP-Bewegung über Grund aus der Dopplerverschiebung des Bottompings
COSYNA	Projekt Coastal Observing System for Northern and Arctic Seas
CTD	Sonde, zur Bestimmung von Salzgehalt, Temperatur und Tiefe
DGPS	Differential GPS, Steigerung der GPS-Positionierungsgenauigkeit auf wenige Dezimeter (2D) durch Verarbeitung von GPS-Korrektursignalen
Ensemble	Zeitintervall über das das ADCP die Daten mittelt um als eine Einheit auszugeben
Error velocity	Differenz beider vertikalen Strömungskomponenten gemessen mit den ADCP-Schwingerpaaren 1-3 und 2-4 pro Tiefenzelle
Flux-gate	Magnetkompass zur vektoriellen Bestimmung des Magnetfeldes
GDOP	Geometrical Dilution of Precision, ein Skalar, das die Genauigkeit der GPS-3D Positionsbestimmung aufgrund der geometrischen Satellitenkonstellation abschätzen lässt
GK-KS	Gaus-Krüger-Koordinaten System, ein winkeltreues metrisches kartesisches Koordinatensystem
GGA	GPS-Datentelegramm mit Uhrzeit, 3D Position und Qualitätsmerkmalen
GPS	Global Positioning System, satellitengestütztes Navigationssystem
GPS-Gyro	Schiffskurs bestimmt aus der relativen GPS-Phasenverschiebung gemessen mit zwei GPS-Empfängern
GYRO	engl. Begriff für Kreiselkompass
HF-Radar	auch Wellenradar (Wera) oder Codar genannt, misst mit elektromagnetischen Wellen im HF-Bereich Oberflächenströmung und Seegang im Bereich > 100 km
HZG	Helmholtz-Zentrum Geesthacht Zentrum für Material- und Küstenforschung
ICON	Projekt Integrated Coastal Observatory North Sea
IFK	Institut für Küstenforschung am HZG
NMEA	National Marine Electronics Association
PDOP	Skalar aus Position Dilution of Precision, reziproker Wert aus dem Volumen zwischen den Satelliten und dem Rover
PDGPS	Precise Differential GPS, Steigerung der GPS-Positionierungsgenauigkeit in Zentimeterbereich (3D) durch Verarbeitung von GPS-Korrektursignalen
Ping	ein einzelnes Ultraschallwellenpaket
PPT	engl. pars per thousand entspricht Promille ‰ in der SI-Tabelle
RDCP	Radar Doppler Current Profiler, radarbasiertes Strömung und Seegangsmesssystem
RDI	U.S. amerikanischer Gerätehersteller RDInstruments, gegründet in 1981 von F.Rowe und K.Deines
Referenzstation	häufig auch Base genannt, verschickt über Funk, Internet oder GSM GPS-Korrekturdaten
Rover	häufige Bezeichnung eines mobilen GPS-Empfängers

Scanbereich	horizontale Fläche, die vom RDCP abgetastet wird
SonTek	U.S. amerikanischer ADCP Hard und Software Hersteller
SPM	engl. <i>suspended particulate matter</i> , in der Wassersäule aufgelöste Sedimente oder andere Schwebstoffe
Tiefenlayer	eine horizontale Schicht mit konstanter Tiefe bezogen auf den Wasserspiegel in einem ADCP-Profil
Tiefenzelle	Ausschnitt aus der Wassersäule vertikal begrenzt durch die voreingestellte Tiefenzellengröße und horizontal durch das Zeitintervall (Ensemblezeit)
Ultraschall	Frequenzen oberhalb der menschlichen Hörgrenze von ca. 20kHz
ViSea DAS	Software zu ADCP-Datenerhebung und –auswertung des Herstellers AquaVision
Water Mod	Vorkonfigurierte Geräteeinstellung (Signalprocessing) in Abhängigkeit von Fließgeschwindigkeiten und Messtiefen
WinRiver	Windows basierte Software des Herstellers RDI zu ADCP-Datenerhebung und –auswertung
WGS-84	World Geodetic System 1984, Erdmodell auf das sich die GPS-Messung bezieht
VTG	GPS-Datentelegramm mit Kurs und Geschwindigkeit über Grund



# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Allgemeines

In vielen Bereichen des Küstenschutzes und der Sicherheit im Schiffsverkehr ist die Kenntnis der Strömungsverhältnisse wichtig. Besonders für die Überwachung von Flachwassergebieten mit Sandböden zwingt die hohe zeitliche und räumliche Variabilität der Bathymetrie (Topographie des Meeresbodens) zur häufigen Beobachtungen. Vermessungen komplexer Strömungsverhältnissen in Hafeneinfahrten, Zufahrtsrinnen oder Bereichen, in denen z.B. die Wanderung von Sanddünen die Schiffsicherheit bedrohen können, werden große Anforderungen an Qualität und Zuverlässigkeit der Daten gestellt.

Aufgrund der Wirtschaftlichkeit, hoher Informationsdichte und der Zuverlässigkeit, haben sich hydroakustische Strömungsmesssysteme seit Anfang der 90-er Jahre des letzten Jahrhunderts als Standard durchgesetzt. Der Pionierhersteller und heutige Marktführer ist die Firma RD Instruments aus Kalifornien in den USA, die bereits Mitte der 1970-er den ersten hydroakustischen Sensor namens *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) herstellte und testete. In den 80-ern wurde diese Technik verbessert und um die Einsatzmöglichkeiten auf Schiffen, stationären Messungen durch Bodenverankerung oder zur Strömungsmessung in verschiedenen Tiefen, durch die Verwendung unterschiedlicher Arbeitsfrequenzen, ergänzt [RDI Broadband Primer, 1996].

Von einer Bodenverankerung aus misst der Sensor ADCP punktuell den dreidimensionalen Strömungsvektor permanent und hochauflösend in der Zeit für verschiedene Tiefenschichten bis hin zur Wasseroberfläche. Bei einer horizontalen Montage, z.B. an einer Kaimauer im Hafenskanal, kann die Strömung kontinuierlich in einer bestimmten Tiefenschicht überwacht werden. Eingesetzt auf einem Schiff misst das ADCP das Strömungsprofil vertikal von dem Schiffsrumpf bis zum Gewässerboden. Durch die Translation des Schiffes entlang von Profillinien, können die mehrdimensionalen Strömungsmessung (3D) in verschiedenen Tiefen zur verschiedenen Tidephasen vermessen und z.B. zu einem Strömungsatlas für ein Gebiet zusammengesetzt werden. Mit Hilfe der hydrodynamischen Modellierung können dann z.B. in einem Fluss oder Kanal die Veränderungen des Gewässerbodens, die durch bestimmte Küstenschutzmassnahmen entstehen können wie z.B. Einsatz von Buhnen, die eine Änderung im Strömungsfeld bewirken, prognostiziert werden.

Für die Erfassung der Strömungsverhältnisse großer Flächen z.B. in Gebieten unter Gezeiten Einfluss, bedeutet es oft viele, zeitaufwändige und dadurch kostspielige ADCP-Schiffsprofile aufzunehmen. An dieser Stelle bietet es sich an, z.B. radarbasierte Fernerkundungsmethoden einzusetzen, die auf verschiedenen zeitlichen und räumlichen Skalen die oberflächennahe Strömung messen.

## 1.2 Problemstellung

Die Möglichkeit Strömungsfelder flächenhaft zu messen, bieten nur Fernerkundungsmethoden. Eine davon ist zum Beispiel das **R**adar **D**oppler **C**urrent **P**rofiler (RDCP) Messsystem, das am **I**nstitut für **K**üstenforschung (IFK) entwickelt wird (Cysewski et al. 2010). Das Messsystem erlaubt von Land aus oder beim Schiffseinsatz oberflächennahe Strömungsfelder hochauflösend zu erfassen. Um die Qualität der Strömungsmessung mit dem RDCP verbessern zu können, muss unter anderem der Einfluss des Windes auf die Strömung der Grenzschicht Luft-Wasser (Winddrift) und die Winkelabhängigkeit der Dopplerverschiebung der Radarwelle bei der Rückstreuung an der rauen Wasseroberfläche untersucht werden. Für diese Untersuchung ist die Kenntnis der Strömungsverhältnisse und ihrer Variation im *Scanbereich* des Radars (maximale Reichweite von einer Seemeile mit einer Zellenauflösung von 7,5 m) zwingend notwendig. Die unter dem Schiffboden zeitgleich erhobenen ADCP-Daten liefern aber aufgrund der ADCP-Einbautiefe keine Strömungsinformationen innerhalb der obersten Wasserschicht, denn in den Messkampagnen waren Einbautiefen von 1,7 bis 4,0 m vorgekommen, siehe Details im Kapitel 3. Das Fehlen der Strömungsinformation in der obersten Wasserschicht muss also in dieser Arbeit aus den vorhandenen Strömungswerten unterhalb des Schiffsbodens durch Extrapolation zur Wasseroberfläche hin abgeschätzt werden.

Diese extrapolierten Daten werden nicht nur zur Kalibrierung des Messsystems RDCP verwendet, sondern auch zur Validation eines weiteren Strömungsmesssystems namens WERA (**W**ellen **R**adar), das an der UNI-Hamburg entwickelt wurde und von dem Institut für Küstenforschung operationell eingesetzt wird. (Quelle: [http://www.coastalwiki.org/coastalwiki/Use\\_of\\_ground\\_based\\_radar\\_in\\_hydrography](http://www.coastalwiki.org/coastalwiki/Use_of_ground_based_radar_in_hydrography), abgerufen am 19.02.2011). Dieses Radar wird auch Wellen- oder Überhorizonradar genannt, weil die abgestrahlte elektromagnetische Welle der Erdkrümmung folgt und Reichweiten von bis zu 200 km möglich sind. In der durch das IFK verwendeten Konfiguration misst dieses Radarsystem kontinuierlich von drei Stationen aus (Wangerooge, Büsum und Sylt) die radiale Strömung in der südlichen Deutschen Bucht und liefert alle 20 Minuten eine Strömungskarte mit der Zellenauflösung von 2 km x 2 km, siehe Anhang G. Um die Validation dieses Messsystems durchführen zu können, müssen die Vergleichsdaten nicht nur im Raum, sondern auch in der Zeit zugeordnet werden.

Die Durchsicht der gemessenen ADCP-Daten in verschiedenen Messgebieten zu unterschiedlichen Tidezeiten sowie Wind-Seegangssituationen zeigt die Notwendigkeit die Strömungsdaten auf ihre Qualität zu prüfen und einige Korrekturen anzubringen, bevor diese Strömungsmessungen über eine Parametrisierung zur Wasseroberfläche extrapoliert werden können. Bei dieser Qualitätsprüfung handelt es sich z.B. um die Wahl der Referenzen, Hard- und Softwarekonfigurationen, Ausreißerbeseitigung, Einbaufehler- und Offsetkorrekturen, die signifikanten Einfluss auf die gemessene Strömung haben. Bei dieser Qualitätsprüfung fielen einige Artefakte im Strömungsfeld auf, die aufgrund von Kombinationen bestimmter Messbedingungen und Messverfahren entstanden sind und nichts mit der natürlichen Hydrodynamik in

den Messgebieten zu tun haben, obwohl sie gleiche Größenordnungen wie reale Strömungswerte erreichen können. Deswegen müssen innerhalb dieser Arbeit folgende Fragen beantwortet werden:

- Welchen Einfluss hat die Plattformbewegung auf die ADCP-Messung und wie ist der Zusammenhang dieser Bewegung zu der Referenz?
- Welche Referenz Bottom Track, GPS-GGA oder GPS-VTG ist geeigneter für die ADCP-Messung in den drei Messgebieten?
- Weshalb sind die ADCP-Schlauchbootmessungen mit baugleichem ADCP-Gerät in demselben Messgebiet verrauschter im Vergleich zu der Prandtlmessung?
- Besteht die Möglichkeit die Schallgeschwindigkeit abzuschätzen und wenn ja, welche Unsicherheit folgt für die Strömungsbestimmung?
- Ist das Teilgebiet, in dem die Radarkalibrierungsmessung durchgeführt wurde, homogen bezüglich der Strömung?
- Welche Form der Parametrisierung der Strömung in der Wassersäule ist geeigneter im Bezug auf die Extrapolation zur Wasseroberfläche in Gebiet Lister Tief?
- Ist es zulässig ein unvollständiges Vertikalprofil zu parametrisieren und anschließend bis zur Wasseroberfläche zu extrapolieren?

Um die Qualität der ADCP-Messdaten sichern zu können, musste ein erweitertes Postprocessing ergänzend zu der Hersteller-Software implementiert werden, da keine Software auf dem Markt diese Korrekturen und die Parametrisierungsmöglichkeiten in einem Paket bietet, siehe Kapitel 2.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die Gliederung der Arbeit gegeben.

Im Kapitel 2 werden die hydroakustischen Grundlagen, das Signalprocessing sowie die Berechnungen vorgestellt, die notwendig sind, um ein Strömungsvektor mit einem ADCP zu bestimmen. Der Einfluss der Plattformbewegungen und ihre Kompensation werden ebenfalls diskutiert wie auch der Einfluss der Temperatur und des Salzgehaltes auf die Schallgeschwindigkeit. Störungen verursacht durch die Nebenkeulen und Schichtungen im Wasser werden erwähnt. Die verschiedenen Einsatzbereiche der ADCP's (verschiedene Arbeitsfrequenzen) wie auch die Messkonfigurationen (Water Modi) werden zusammengestellt. Abschließend folgt ein kurzer Marktüberblick der ADCP Hard und Software.

Die drei Messgebiete mit ihren charakteristischen Strömungseigenschaften werden im Kapitel 3 vorgestellt. Die ausgesuchten ADCP-Datensätze werden präsentiert und die daraus resultierenden Fragen bezüglich der Messqualität, der Homogenität sowie der Parametrisier-

barkeit formuliert. Bezüglich der Messqualität wird es notwendig einige Grundlagen der GPS-Technik zu erläutern und die Qualität der eingesetzten GPS-Geräte zusammenzustellen. Die Skizze des Datenflusses während der Datenerhebung schließt das Kapitel ab.

Im Kapitel 4 wird die gesamte Datenprocessing erläutern. Der Einfluss der fehlerhaften Schallgeschwindigkeit und des ADCP-Einbaufehlers über den Referenzenvergleich Bottom Track, GPS-GGA und GPS-VTG sowie ihren Einfluss auf die Qualität der Strömungsmessung diskutiert. Der Einfluss der Plattformbewegung auf die Messdaten wird untersucht. Die daraus folgende Forderung an die Softwarehersteller wird formuliert und die ersten Fragen bezüglich der Datenqualität aus dem dritten Kapitel beantwortet. Einige notwendige Korrekturen der Messdaten sowie eine Datenbereinigung mussten mit einem selbstimplementierten Softwareprototyp durchgeführt werden.

Die Datenanalyse bezüglich der Homogenität der Strömung sowie die Parametrisierung der Strömungsprofile mit einer anschließenden Extrapolation, werden im fünften Kapitel besprochen. Die Kriterien zur Wahl der geeigneten Parametrisierung resultieren aus der Validierung der Extrapolation anhand von ADCP-Schlauchbootdaten.

Zusammenfassung und Empfehlungen für die zukünftigen Messkampagnen sind im Kapitel 6 enthalten.

Der Anhang A beinhaltet Bilder der eingesetzten Forschungsschiffe. Im Anhang B sind Detailinformationen zu den GPS-Datenstrings, die in dieser Ausarbeitung verwendet werden. Ein ADCP-Datenbeispiel und die Formatspezifikationen befinden sich im Anhang C. Im Anhang D sind Snapshots der wichtigsten Messwerte der verwendeten ADCP-Profile. Eine Schallgeschwindigkeitstabelle, die die Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Salzgehalt und der Temperatur zusammenstellt, befindet sich im Anhang E. Der Anhang F zeigt die vertikalen Temperatur- und Salzgehaltsverläufe gemessen an der Elbe und im Lister Tief. Ein Beispiel für eine ADCP Strömungskarte, radiale Windkalibrierung und eine Strömungskarte erhoben mit dem Überhorizontadar können im Anhang G eingesehen werden.

Der Quellcode des PV-WAVE Softwareprototyps, alle in dieser Arbeit ausgewertete ADCP-Datensätze (raw und ASCII), die Messdaten der zitierten CTD-Vertikalprofile sowie der Rohdatensatz der stationären GPS-Messung befinden sich auf der beigefügten CD-ROM (Anlage)

Alle kursiv gestellten *Begriffe* innerhalb des Textes dieser Arbeit werden im Glossar erläutert.

## 2 Grundlagen ADCP

In den letzten zwei Jahrzehnten ist das ADCP zum Standardmesssystem für die Strömung geworden. Laut dem Erfahrungsbericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde aus dem Jahre 2007 gibt es weltweit sechs Hersteller, die die akustischen Messsysteme für verschiedene Zwecke entwickeln (BFG 2007). Neben der Sensorentwicklung gibt es auch eine Anzahl an Datenaufnahme und –auswertesoftware, die teilweise herstellerübergreifend verwendet werden können, siehe Überblick im Abschnitt 2.10.

Die Daten, die in dieser Ausarbeitung behandelt werden, sind mit den Geräten und der Software des Herstellers RDI erhoben und ausgewertet worden. Daher stammen die Grundlagen des ADCP's in diesem Kapitel hauptsächlich aus der RDI Publikation „Principles of Operation A Practical Primer“ erschienen in 1996. In diesem Kapitel sind diese Grundlagen zusammengestellt, um dem Leser die einzelnen Prozessschritte vom Aussenden eines Ultraschallwellenpaketes bis hin zu Berechnung der absoluten Strömungswerte in verschiedenen Tiefenschichten plastisch darzustellen. Gleichzeitig wird auf die Aspekte der Qualität und Zuverlässigkeit der Strömungsmessung bei einzelnen Prozessschritten hingewiesen und auf den Zusammenhang mit der Problematik (z.B. Naturmessung oder gerätebedingte Artefakte), die in der Einleitung erwähnt wurde, hervorgehoben.

### 2.1 Schallausbreitung im Wasser

Wie aus der Echolottechnik bekannt, sind die Ultraschallwellen (Frequenzen oberhalb der Hörgrenze des menschlichen Ohres) aufgrund ihrer Eigenschaft der Dämpfungsarmut besonders geeignet, um in dem Medium Wasser die Tiefe des Meeresbodens bestimmen zu können (Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Ultraschallwellen>, besucht am 23.10.2010). Hierzu wird für die Bestimmung der Laufzeitmessung folgende Abhängigkeit genutzt:

$$s = (c * t) / 2 \quad (2.1)$$

wobei:

s := Strecke zwischen Echolot und dem Reflektor (Meeresboden) in m

c := Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwellen im Wasser in m/s

t := verstrichene Zeit zwischen dem aussenden der Welle und dem empfangenen Echo in Sekunden

Da bei dieser Messung die Schallwelle den doppelten Weg zurücklegt (Echolotsender → Meeresboden → Echolotempfänger), muss die errechnete Strecke durch zwei dividiert werden, um die Tiefe berechnen zu können.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwellen steht im folgenden Zusammenhang zu der Frequenz und der Wellenlänge (RDI 1996):

$$c = f * \lambda \quad (2.2)$$

wobei:

$c$  := Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwellen im Wasser in m/s

$f$  := Frequenz der Ultraschallwellen in Hz

$\lambda$  := Wellenlänge der Ultraschallwelle (Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Wellenberge) in m

Die Frequenz der abgestrahlten Welle des Ultraschallschwingers ist bekannt. Bewegt sich der Sender auf den Reflektor zu oder von ihm weg, ändert sich die relative Anzahl der zurückkommenden Schwingungen zum Sender pro Zeiteinheit. Dieser Zusammenhang ist allgemein als Dopplereffekt bekannt und wird als Frequenzverschiebung bestimmt (RDI 1996):

$$f_d = f_s (v / c) \quad (2.3)$$

wobei:

$f_d$  := Frequenzverschiebung durch den Dopplereffekt in Hz

$f_s$  := Frequenz der gesendeten Ultraschallwelle in Hz

$v$  := relative Geschwindigkeit zwischen Sender und Reflektor in m/s

$c$  := Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwellen im Wasser in m/s

Die Partikel, die sich in der Wassersäule von Flüssen, Meeren und Ozeanen befinden und die Größe von einem bis zehn Millimeter erreichen (Plankton oder Schwebstoffe), wirken für die Ultraschallwellen als Streuer und ermöglichen die Strömungsmessung. Diese Streuer driften passiv mit dem Wasserkörper und verursachen die Rückstreuung der Ultraschallwelle. Die radiale Strömung auf den Schwinger zu oder von ihm verursacht die Dopplerverschiebung. Die Annahme, dass die sich Streuer passiv mit dem Wasserkörper bewegen, ist die Hauptbedingung für die Zuverlässigkeit hydroakustischer Dopplerströmungsmessungen aller Art (RDI 1996). Eine ADCP Messung unter Laborbedingungen (Leitungswasser) ist meist nur durch Anreicherung mit Schwebstoffen möglich (BFG 2007).

Beim Eintreffen der Ultraschallwelle auf die Partikel entsteht die erste Dopplerverschiebung, die der relativen Bewegung zueinander entspricht. Da die Streuelemente wie ein „zweiter Schwinger“ funktionieren, der sich relativ zum ursprünglichen Schwinger in permanenter Bewegung befindet, wird die ursprüngliche Ultraschallwelle auf dem Weg zurück zum Schwinger erneut frequenzverschoben und die Gleichung (2.3) muss um den Faktor zwei korrigiert werden (2.4). Da die Bewegung in der Natur nur selten exakt auf den Schwinger zu oder von ihm weg erfolgt, muss die Gleichung (2.4) zusätzlich um eine Winkelkorrektur ergänzt werden, um über die Projektion des Strömungsvektors (3D Raum) die radiale Strömungskomponente bestimmen zu können (RDI 1996):

$$f_d = 2 * f_s (v / c) * \cos(\alpha) \quad (2.4)$$

wobei:

- $f_d$  := Frequenzverschiebung durch den Dopplereffekt in Hz
- $f_s$  := Frequenz der gesendeten Ultraschallwelle in Hz
- $v$  := relative Geschwindigkeit zwischen Sender und Reflektor in m/s
- $c$  := Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwellen im Wasser in m/s
- $\alpha$  := Winkel zwischen der Strömungsrichtung und der Ultraschallwellenrichtung gesendet durch den Schwinger in Radiant

## 2.2 Phasenmessung

Theoretisch stellt die Analyse des zurückgestreuten Signals von einem einzelnen Partikel in der Wassersäule hinsichtlich der Berechnung der radialen Geschwindigkeiten aus der Frequenzverschiebung keine große Schwierigkeit dar. Da die Streuer in der Natur nicht einzeln auftreten, ist die Signalverarbeitung weitaus komplexer. Um die Aufgabe zu lösen verwendet RDI eine Methode, die die Phasenverschiebung nutzt, um die Ausbreitungsverzögerung (engl. propagation delay) der driftenden Streuer präziser bestimmen zu können als mit der direkt gemessenen Doppler-Frequenzverschiebung. Diese Methode der Signalverarbeitung wird in den Breitbandgeräten (engl. BroadBand) benutzt sowie die Algorithmen der Autokorrelation um die Mehrdeutigkeiten der Phasenmessung zu lösen. (RDI 1996)

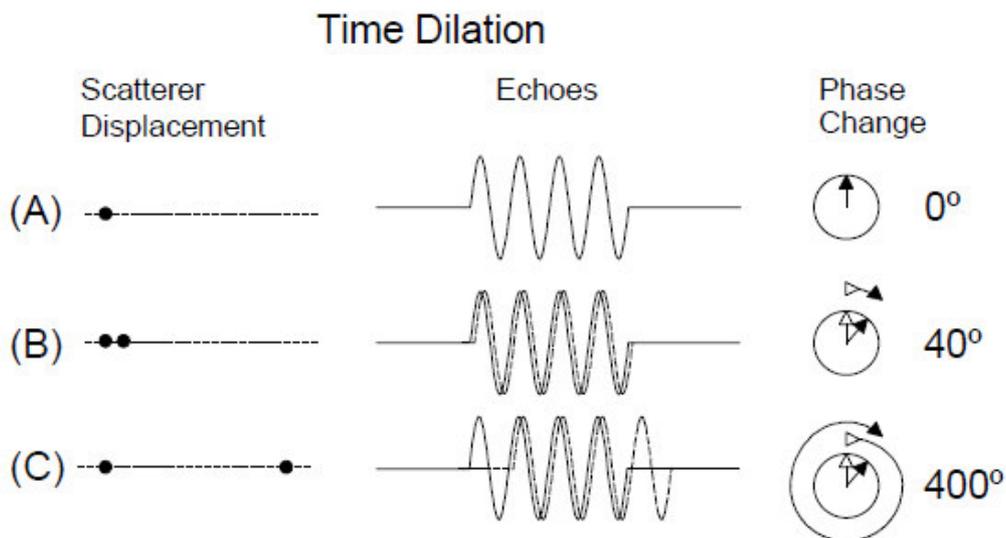


Abb.2.1: Bestimmung der radialen Geschwindigkeiten über die Phasenmessung (BroadBand-Prinzip). (RDI 1996)

Aufgrund verschiedener Strömungssituationen, die in der Natur vorkommen können aber mit einem und demselben ADCP gemessen werden, wie z.B. schneller und rauer Gebirgsfluss oder fast Stillstand im Gartenteich, wurden von RDI die sogenannten Water Modi entwickelt, die die Signalverarbeitung entsprechend steuern, mehr dazu in der Tabelle 2.2 (RDI 1996).

### 2.3 Dreidimensionale Strömungsbestimmung

In der Einleitung wurden bereits typische Einsätze für ein ADCP erwähnt: stationäre Profilmessung vom Meeresboden aus, horizontale Schnitte von Kaimauern und vertikale Profile vom Schiff aus. Die meisten davon handeln von dreidimensionaler Strömungsmessung für verschiedene Wassertiefen. Um absolute Strömungswerte (3D Strömungsvektor) mit dem ADCP messen zu können, werden in der Regel drei bis vier Schwingersysteme eingesetzt, wie in der Abbildung 2.2 dargestellt.



Abb.2.2: RDI ADCP vom Typ Monitor mit vier Schwingern sowie die Ausrichtung der Schwinger beim Schiffsinsatz. Adaptiert von RDI. (Quelle: <http://www.rdinstruments.com/monitor.aspx>, besucht am 24.10.2010).

Um eine flächenhafte Strömungsmessung durch die gesamte Wassersäule in einem Messgebiet durchführen zu können, muss der ADCP Sensor auf einem Schiff montiert werden. Der Kopf des ADCP's wird hierbei nach unten gerichtet im Schiffsrumpf befestigt. Durch die Bewegung des Schiffes entlang von Profillinien entsteht ein vertikaler Schnitt durch die Wassersäule, siehe Abbildung 2.3.

Die vier Schwinger sind typbedingt  $20^\circ$  oder  $30^\circ$  zu der Lotrechten angebracht und messen unabhängig von einander radiale Strömungskomponenten. Aufgrund der Laufzeit werden die radialen Messungen in die sogenannten Tiefenzellen (engl. depth cell oder layer) unterteilt, siehe Abbildung 2.2. Diese Zellen sind bei RDI äquidistant und können vom Benutzer in Abhängigkeit von der Arbeitsfrequenz der ADCP-Schwinger sowie entsprechend der Aufgabenstellung und/oder der Strömungsverhältnisse im Messgebiet voreingestellt werden, siehe auch Tabelle 2.1. Die Anzahl der Tiefenzellen ist begrenzt auf 128. Die Anzahl der abgeschickten Pulse (engl. pings) pro Sekunde und die zeitliche Intervallmitteilung (engl. Ensemble) der zurückgestreuten Signale sind ebenfalls an die Strömungsverhältnisse im Messgebiet sowie an die Aufgabenstellung angepasst. Die Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über die möglichen Modi. Die Einstellungen für die Größe der *Tiefenzellen* (vertikal), Anzahl der Pings innerhalb eines Ensembles, Intervallgröße eines Ensembles (~horizontale Zellengröße) sowie einiger anderer relevanter Parameter können nur einmalig in der Konfiguration vor der Datenerhebung eingestellt

werden und können weder während der laufenden Messung, noch beim Nachbearbeiten der Daten korrigiert werden. Daher ist eine besondere Aufmerksamkeit bei einer Konfiguration geboten und ein Testprofil im Messgebiet unerlässlich.

Aufgrund der Anordnung der vier Schwinger, die in vier verschiedene Richtungen und damit auch zu verschiedenen Orten im Raum blicken, ist es möglich aus den radialen Strömungskomponenten einen dreidimensionalen Strömungsvektor für jede Tiefenzelle in einem Ensemble zu berechnen. Bereits in der schematischen Darstellung der Abbildung 2.3 wird es sichtbar, dass die Homogenität der Strömung innerhalb eines Ensembles gegeben sein muss, um den Strömungsvektor mit Zuverlässigkeit berechnen zu können.

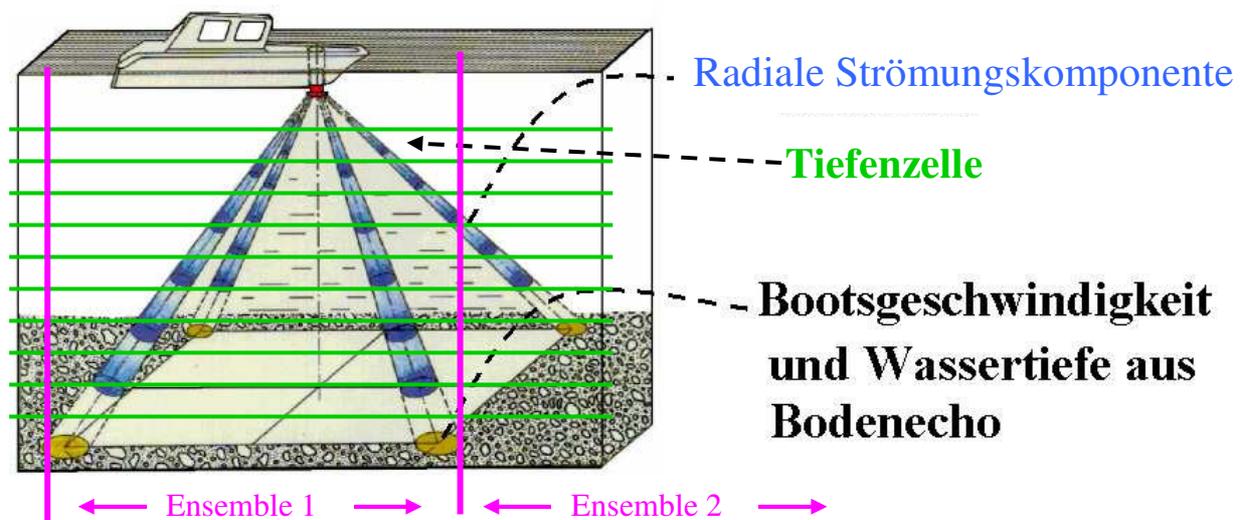


Abb. 2.3: Messprinzip der ADCP Strömungsmessung vom Schiff aus.  
(Quelle: BFG 2004, erweitert durch Cysewski)

Dies ist auch der Grund warum RDI für die Strömungsmessung vom Boden oder vom Schiff aus vier Schwingersysteme verwendet. Aus mathematischer Sicht sind drei Schwinger ausreichend, um die drei Strömungskomponenten nord-süd, ost-west sowie oben-unten zu bestimmen. Der vierte Schwinger wird als Redundanz und zur Abschätzung des Messfehlers (engl. *error velocity*) verwendet und dient damit unter anderem der Überprüfung der Homogenität der Strömung innerhalb eines Ensembles. Dieser Messfehler wird errechnet aus der Differenz der beiden vertikalen Strömungskomponenten (oben-unten), die die Schwingerpaare 1-3 (nord-süd) und 2-4 (ost-west und vertikale Komponente) in den Tiefenzellen gemessen haben, siehe auch Abbildung 2.2.

Frquenz in kHz	<b>76.8</b>	<b>153.6</b>	<b>307.2</b>	<b>614.4</b>	<b>1228.8</b>
Schwingerdurchmesser in mm	280	165	133	101	54
Wellenlänge in mm	20	10	5	2.5	1.25
Breite der Hauptkeule in Grad bei -3dB	5	4	2.2	1.5	1.4
abgestrahlte Leistung in Watt	250	250	80	30	15
Absorbtionskoeffizient in dB/m	0.022-0.028	0.039-0.050	0.062-0.084	0.14-0.20	0.44-0.66
typische Reichweiten in Meter	700	400	120	60-80	25
ringing (Blank after transmit) in m	6	4	2	1	0.5
minimale Zellengrösse in cm	400	400	25	10	5
typische Zellengrösse in cm	1600	800	100	50	25
typische Pingfrequenz in Hz	0.7	1.5	5	5	5

Tabelle 1.1: Zusammenstellung ausgewählter technischer Details zu den häufigsten ADCP-Typen in Abhängigkeit von der Arbeitsfrequenz der Schwinger (nach RDI 1996)

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

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

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

Note 1. Mode 12 table assumes 20 sub-pings (WO 20.4).

Tabelle 1.2: Übersicht der Messmodi in Abhängigkeit der Strömungsverhältnisse im Messgebiet. (RDI 2009)

## 2.4 Fehlereinflüsse, Kompensationen und Bezugssysteme beim Schiffseinsatz

Die Unsicherheit der Strömungsmessung beinhaltet Fehler zweier Arten: systematischen (engl. *bias*) und die zufälligen (engl. *random errors*). Die Auswirkung der zufälligen Fehler lässt sich durch das Erhöhen der Anzahl der Pings pro Ensemble minimieren, die der systematischen Fehler können nur durch das Nachkalibrieren beseitigt werden. Es gibt verschiedene Quellen für die systematischen Fehler wie z.B. fehlerhafter Wert der Schallgeschwindigkeit, Einbaufehler, Fehler in der Konfiguration, unpräzise und unzureichende Korrekturen der Schiffsbewegung etc (RDI 1996). Die praktische Auswirkung dieser Fehler wird in den Kapiteln 3 und 4 näher behandelt.

Die Schwinger des ADCP Kopfes sind durchnummeriert, vergleiche Abbildung 2.2. Für den Einbau auf dem Schiff wird empfohlen den Schwinger mit der Nummer 3 in Richtung Bug auszurichten, so dass die Linie gebildet durch die Schwinger 1 und 3 parallel zur Schiffsachse verlaufen. Da dies nur selten gelingt, muss entsprechend der Vorgabe des Herstellers dieser Einbaufehler (Beam 3 Misalignment) korrigiert werden, siehe auch Kapitel 4. (RDI 1996)

Das ADCP misst die Daten in einem eigenen lokalen Koordinatensystem und muss über die Zusatzinformationen aus dem Schiffskreisellkompass (engl. *Gyro*) bzw. aus seinem eignen Magnetkompass (*Flux-gate*), der zusätzlich kalibriert werden muss, versorgt werden, um die Strömungen nordorientiert auszugeben. Der Hersteller RDI empfiehlt den eingebauten Magnetkompass nachzukalibrieren, wenn das Messgebiet 10 bis 40 Meilen von dem Ort entfernt ist, an dem die erste Bestimmung der magnetischen Missweisung erfolgt ist (RDI 2003, Abschnitt 7.4). Für eine Strömungsmessung, die mehrere Tage andauert und z.B. quer durch die Nord- oder Ostsee führt, wird man aus praktischen Gründen den Schiffskreisell benutzen. Griffiths 1997 und Ruiz 2002 haben den breitenabhängigen Kreisellkompassfehler bestimmt und mit dem *GPS-Gyro* verglichen. Bei einem *GPS-Gyro* wird der Schiffkurs aus der Phasendifferenz des GPS-Signals an zwei GPS-Antennen bestimmt.

In Abhängigkeit vom Nutzerkreis (Hydrologen, Ozeanographen oder Geodäten) werden verschiedene Bezeichnungen der Geschwindigkeitskomponenten verwendet. Deswegen besteht an dieser Stelle die Notwendigkeit einer Definition für diese Ausarbeitung, die in Anlehnung an das U.S. Geological Survey (Mueller & Wagner 2009) erfolgt:

$$V = \sqrt{(V_x)^2 + (V_y)^2 + (V_z)^2} \quad (2.5)$$

und

$$V_i = \sqrt{(V_x)^2 + (V_y)^2} \quad (2.6)$$

wobei:

- $V$  := Betrag der Strömung (Strömungsstärke) in m/s
- $V_i$  := horizontaler Betrag der Strömung (Strömungsstärke) in m/s
- $V_x$  := Ost-West-Komponente der Strömung in m/s
- $V_y$  := Nord-Süd-Komponente der Strömung in m/s
- $V_z$  := Vertikal-Komponente der Strömung in m/s

Bei dem durch Ruiz 2002 beschriebenen Experiment lagen 87.6% der Fehler des Kreiselkompasses zwischen 1,4° und 3,4°. Damit ergibt sich nach Griffiths 1994 (2.7) ein Fehler in der Betragsbestimmung, der z.B. bei einer Strömung von 1,2 m/s 7 cm/s beträgt.

$$V_{\text{err}} = V_i * \sin(\Theta) \quad (2.7)$$

wobei:

$V_{\text{err}}$  := Fehler vom Betrage der Strömung in m/s

$V_i$  := gemessener Strömungsbetrag in m/s

$\Theta$  := Kreiselkompassfehler in Grad

Um die auf einem Schiff erhobene Strömungsmessung in ein globales Koordinatensystem zu transformieren, muss nicht nur die Orientierung des Schiffes gegen Nord (engl. heading), der Einbaufehler des dritten Schwingers sondern auch die Schiffsgeschwindigkeiten bekannt sein, um sie von den relativen ADCP-Messungen zu subtrahieren. Die Bestimmung der Schiffsgeschwindigkeit kann auf drei Wegen erfolgen (RDI 2003):

1. **Bottom Tracking Mode (BTM)**. Die vier Schwinger des ADCP's messen unabhängig voneinander den Abstand zum Boden. Der Boden reflektiert ein viel stärkeres Echo als das von der Streuung an den Schwebstoffen im Wasser und ist dadurch leichter zu detektieren. Aus der Dopplerverschiebung der Bottompings kann die eigene Bewegung über Grund eingemessen werden. Durch die Schräglage im Raum (Neigungswinkel zur Lotrechten sowie der Stampf- und Rollwinkel) erfassen alle vier Schwinger einen anderen Ort am Boden, siehe Abbildung 2.3. Für die mittlere Tiefe werden alle vier Tiefenwerte gemittelt. Der Hersteller gibt für diese Mittelung eine Genauigkeit von ca. 0,1 m an und für die Genauigkeit der Geschwindigkeitsbestimmung einige mm/s.
2. **GPS-GGA**. GGA ist ein Positionsstring im NMEA-Format und beinhaltet Informationen über die Uhrzeit, Position als Breite, Länge und Höhe über WGS-84 sowie Angaben über die Qualität des GPS-Signals. Details im Anhang B.
3. **GPS-VTG**. VTG ist ebenfalls ein String im NMEA-Format und informiert über den Schiffkurs und –geschwindigkeit über Grund. Details im Anhang B.

Die Bewegung des ADCP auf einem Schiff (Rollen und Stampfen) sowie die Schräglage im Raum, werden durch den intern eingebauten Bewegungssensor automatisch kompensiert (RDI 2003). Dass dieses nicht immer hinreichend präzise erfolgt und die Auswirkung der Fehlenden Hubkorrektur wird in den Kapiteln 3 und 4 gezeigt.

## 2.5 Echointensität und Reichweiten

Wie bereits oben erwähnt, ist das zurückgestreute Signal von den Schwebstoffen in der Wassersäule schwächer als z.B. vom Boden. Je größer die Entfernung vom Schwinger, umso zunehmend schwächer ist das zurückkommende Signal. Die Intensität dieses Echos hängt von

Faktoren ab wie Schallabsorbtion, gesendeter Leistung, Rückstreukoeffizienten, Schallstreuung (engl. *beam spreading*) und kann nach (2.8) berechnet werden (RDI 1996):

$$EI = SL + SV + \text{Konstante} - 20\log(R) - 2aR \quad (2.8)$$

wobei:

- EI := Echointensität in dB
- SL := Sendeleistung in dB
- SV := Volumenbezogene Rückstreuung in dB
- a := Absorbtionskoeffizient
- R := Entfernung vom Schwinger in m

Die Konstante wird hinzugefügt, weil es sich hierbei um eine relative Messungen handelt. Das ADCP sieht nur Veränderungen in der Echointensität und ist nicht in der Lage eine absolute Messung durchzuführen. Wenn jedoch aus der ADCP Rückstreuintensitäten auf das in der Wassersäule aufgelöste Sediment oder andere Schwebstoffe (engl. *suspended particulate matter SPM*) geschlossen werden soll, müssen häufige Kalibrierungen durchgeführt werden. Souza 2007 benutzt jeden einzelnen Schwinger als Informationsquelle und berechnet aus den relativen Messungen SPM Konzentrationen mit einer Korrelation von 0.86.

Der Tabelle 2.1 können die Reichweiten und die Schallabsorptionen in Abhängigkeit von der Frequenz und der Sendeleistung entnommen werden. Die geometrische Ursache für die Dämpfung des Echos ist die Schallstreuung. Die beschallte Fläche steigt mit dem Quadrat der Entfernung vom Schwinger. Es werden dadurch zwar mehr Streuer getroffen, die Intensität des zurückkehrenden Echos direkt zum Schwinger ist jedoch aufgrund der Streuung um ein viertel kleiner.

## 2.6 Schallgeschwindigkeit

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwellen im Wasser hängt primär von drei Faktoren Salzgehalt, Temperatur und Tiefe(~Druck) ab. Nach (Urlick 1983) wird die Schallgeschwindigkeit wie folgt berechnet:

$$C = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016D \quad (2.9)$$

wobei:

- C := Ultraschallgeschwindigkeit in mm/s
- T := Wassertemperatur in °C
- S := Salzgehalt in ‰
- D := Tiefe in Metern

Das ADCP misst die Wassertemperatur direkt am Schwingerkopf und benötigt einen Schätzwert für den Salzgehalt um selbst die mittlere Schallgeschwindigkeit auszurechnen (RDI 1996). Es besteht aber auch die Möglichkeit gleich die mittlere Schallgeschwindigkeit vorzugeben, d.h. sämtliche Messungen (Tiefe und Strömungsbestimmung) entstehen unter der

Annahme, dass die Temperatur-, Dichte- und Salzverhältnisse in der gesamten Wassersäule konstant und homogen im Messgebiet verteilt sind. Eine Vorgabe vom Schallprofil (Schallgeschwindigkeit vs. Tiefe) wie z.B. bei einem Fächerecholot ist hier nicht möglich. Bei einer fehlerhaften Konfiguration (Salzgehalt und/oder Temperatur) vor oder während der Messung kann nachträglich geändert werden, so dass die Tiefenmessung (Tiefenzellenzuordnung) dann korrekt berechnet wird. Der Einfluss der Schallgeschwindigkeit wird in den Kapiteln 3 und 4 vertieft diskutiert.

## 2.7 Änderungen der Schallgeschwindigkeit mit der Tiefe

Die Änderung der Schallgeschwindigkeit mit der Tiefe hat keinen Einfluss auf die Qualität der horizontalen Komponente der Strömungsmessung mit ADCP. Die Veränderungen der Schallgeschwindigkeit bewirken Refraktion oder Beugung, die genau die horizontale Komponente der Schallwelle unverändert lassen, siehe Abbildung 2.4. Den theoretischen Hintergrund für diese Erscheinung liefern Snell's Gesetze, die besagen, dass die horizontale Wellenzahl beim Passieren durch horizontale Grenzschichten (engl. interfaces) unverändert bleibt. Weil die Frequenz konstant bleibt, bleibt die horizontale Komponente der Schallausbreitungsgeschwindigkeit ebenfalls konstant und somit bleibt die Messung der horizontalen Geschwindigkeiten von diesem Effekt unbeeinflusst. Die Veränderungen der vertikalen Komponente der Strömungsgeschwindigkeit sind aber proportional zur Änderung in der Schallgeschwindigkeit. (RDI 1996)

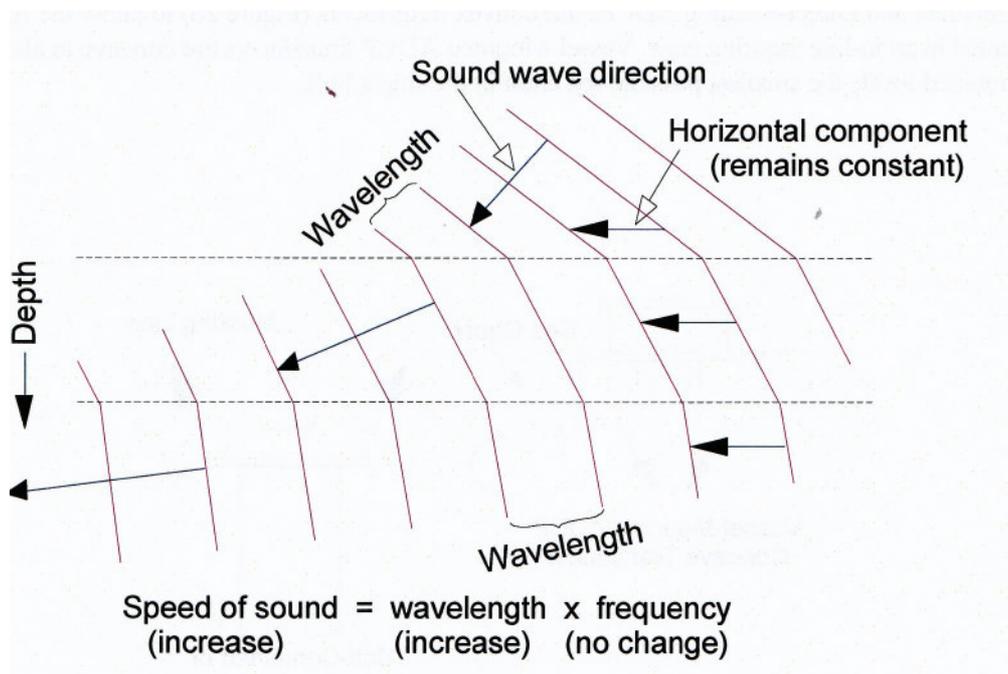


Abb. 2.4: Tiefenabhängige Veränderung der Schallausbreitung. Die horizontale Komponente der Schallgeschwindigkeit bleibt jedoch durch die Refraktion unverändert. (RDI 1996)

## 2.8 Schichtungen im Wasser

Nicht alle Gewässertypen sind vertikal durchmischt wie z.B. ein Gebirgsfluss. Durch einige Vorgänge im Meer können sich horizontale Schichten mit verschiedenen Dichten, Temperaturen und Salzgehalten ausbilden. Einige Frequenzen der ADCP's können aufgrund zu schwacher Leistung durch diese Schichtung nicht durchdringen und die Strömungsmessung unmöglich gestalten, siehe auch Beispiele im Kapitel 3. Es reicht manchmal ein Sturmereignis um diese Schichtungen aufzulösen und die Messung kann mit demselben ADCP ohne Probleme erfolgen. Über die Änderung der Schallprofile innerhalb der Schichtungen und damit zusammenhängenden systematischen Fehler in der Strömungs- und Tiefenbestimmung gibt es keine Auskunft weder vom Hersteller noch in den wissenschaftlichen Publikationen, die bis dato gelesen worden sind.

## 2.9 Nebenkeulen

Um Mehrwegeausbreitung der Schallwellen in der Nähe des Schwingerkopfes zu vermeiden, sollte der Bereich um die Schwinger herum ca.  $15^\circ$  Freiraum haben. Jeder Echolotschwinger hat nicht nur die Hauptkeule, wie in der Abbildung 2.3 schematisch dargestellt, sondern auch Nebenkeulen, die das Echo von der Hauptkeule überlagern, vergleiche Abbildung 2.5. Die Nebenkeulen treten bereits ab  $15^\circ$  links und rechts der Hauptkeulen auf. Die Hauptnebenkeulen haben die Blickrichtung  $40^\circ$  relativ zu der Hauptkeule und sollten beachtet werden. Allgemein gilt für die Berechnung der Reichweiten mit ungestörten Strömungswerten (RDI 1996):

$$R_{\max} = R * \cos(\theta) \quad (2.10)$$

wobei:

- $R_{\max}$  := maximale Reichweite in m
- $R$  := Entfernung vom Schwinger in m
- $\theta$  := Winkel der Hauptkeule zur Lotrechten in Radiant

Daraus ergibt sich ein Bereich von 6% der Wassertiefe bei einem 20° Schwingersystem in der Bodennähe, der durch die Nebenkeulen überlagert sein kann, und 15% der Tiefe bei einem 30° System. (RDI 1996)

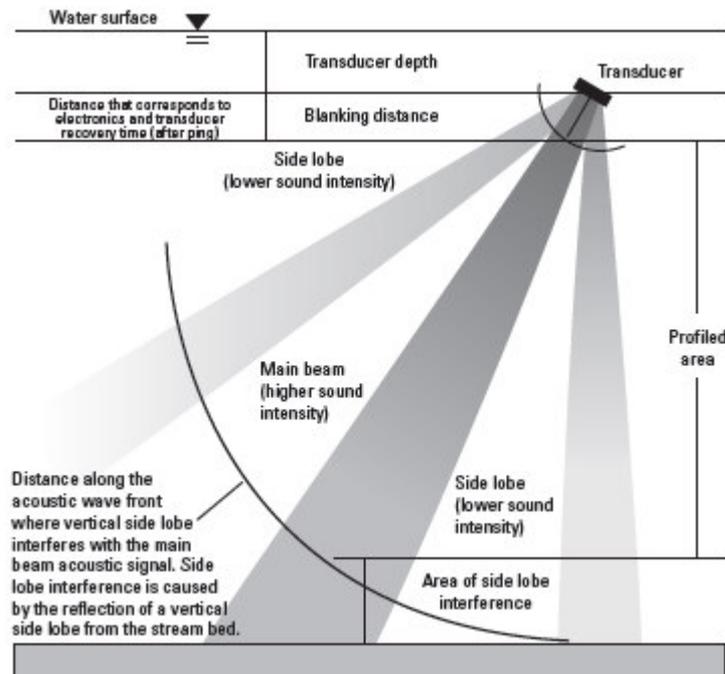


Abb. 2.5: Schematische Darstellung der Haupt- und Nebenkeulen der ADCP-Schwinger (USGS 2009).

## 2.10 Hard- und Software - Marktübersicht

Wie am Anfang des Kapitels 2 bereits erwähnt, gibt es weltweit sechs Hersteller, die akustische Strömungssensoren entwickeln. Dazu zählen folgende Firmen (nach BFG 2007):

- Teledyne RD Instruments ([www.rdinstruments.com](http://www.rdinstruments.com))
- SonTek/YSI, ([www.sontek.com](http://www.sontek.com))
- NorTek AS ([www.nortek-as.com](http://www.nortek-as.com))
- Aanderaa ([www.aanderaa.com](http://www.aanderaa.com))
- LinkQuest Inc. ([www.link-quest.com](http://www.link-quest.com))
- Ott Messtechnik ([www.ott-hydrometry.de](http://www.ott-hydrometry.de))

Jeder Hersteller bietet für verschiedene Einsätze unterschiedliche Hardwarelösungen. Eine Zusammenstellung der Gerätetypen an dieser Stelle wird aufgrund der Vielzahl und der Vielfalt vernachlässigt. An einigen Stellen in dieser Arbeit wird jedoch gezielt auf einzelne Produkte anderer Hersteller eingegangen, falls sie eine bessere Lösung als RDI bieten.

In der Regel wird die Software zur Datenerhebung und –auswertung passend zum Gerät mitgeliefert. Die wichtigsten Messwerte pro Parameter (z.B. Echointensität, Strömung in verschiedenen Tiefen, Navigationsdaten, Durchflussmengen, u.v.m.) sind bei allen Softwarevarian-

ten graphisch oder tabellarisch in Echtzeit darstellbar. Da diese Originalsoftware für die Nachprozessierung der Daten nicht immer den Ansprüchen der Benutzer genügt, entstanden einige Softwareprodukte, die hier als eine Auswahl zusammengestellt werden.

Die Datensätze, die in dieser Arbeit verwendet werden, sind ausschließlich mit den Geräten des Herstellers RDI sowie der Software *WinRiver I* in der Version 1.06 erhoben und nachprozessiert worden. Wie der Name schon sagt, ist „WinRiver“ eine Windows basierte Software für Flussvermessung. Sie besteht aus zwei Modulen: Acquire (Datennahme) und Playback (Postprocessing). Die Konfiguration der Messparameter erfolgt über einen Wizard, der mit einer einfachen und intuitiven Benutzeroberfläche aufwartet. Die Messdaten werden dann in Echtzeit auf dem Bildschirm dargestellt. Mit dem Playback Paket, können die Rohdaten nachprozessiert werden. An dieser Stelle können einige Werte der ursprünglichen Konfiguration angepasst bzw. korrigiert, referenziert (BTM, GGA oder VTG) oder in der Zeit gemittelt und das Ergebnis graphisch dargestellt werden, siehe hierzu Kapitel 4. Die Ausgabe der Daten im klassischen RDI ASCII Format kann dann profilübergreifend ausgegeben werden. Die neuere Version *WinRiver II* wurde nicht eingesetzt, weil sie anfänglich nicht stabil war und die Konfiguration um einiges komplexer ausfällt. Aufgrund der Flexibilität in der Konfiguration von externen Sensoren, Datenausgabeformaten und der Kompatibilität mit aktuellen Betriebssystemen, wird in der nahen Zukunft WinRiver II verwendet. WinRiver Programme funktionieren nur in Verbindung mit den Flachwasser bzw. Shelf ADCP's (z.B. 1200kHz und 600kHz). Tiefsee RDI ADCP's (38 bis 300 kHz) werden über die Software *VM-DAS* (Vessel Mount Data Acquisition System) betrieben und die Messergebnisse mit *WinADCP* dargestellt. Alle Software Module des Herstellers RDI sind für ADCP-Besitzer kostenlos.

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (*BFG*) hat zwei Programme zum Auswerten der Daten nach der Pegelvorschrift (Richtlinie für u.a. die Durchführung von Durchflussmessungen) entwickelt: *AGILA* und *TIDE*. Beide Programme zielen auf die Nutzergruppe, die an den Durchflussmessungen interessiert ist. So z.B. berechnet *AGILA* die ADCP Messungen unabhängig vom Messweg, vergleicht mehrere Profile mit einander, Speichert die Daten in einer Datenbank u.v.m. Für die Auswertung und Visualisierung der ADCP-Querschnittsmessungen in den Tideflüssen wird die Software *TIDE* eingesetzt. Die Messungen eines ganzen Tidezyklus können gemeinsam ausgewertet werden. Eine vektorielle Darstellung der Strömungsverhältnisse im Flussquerschnitt sowie das Eliminieren von offensichtlich falschen Messungen sind vorgesehen (BFG 2007).

Der niederländische Consulting Firma Aqua Vision bietet ein Softwarepaket namens **ViSea** zur ADCP Datenerhebung mit RDI-Hardware und zur Nachbearbeitung an. Dieses lizenzierte Programm besteht aus mehreren Modulen:

(Quelle: <http://www.aquavision.nl/eng/software.php> besucht am 27.10.2010)

- ViSea Data Acquisition Software (DAS): erlaubt die Konfiguration und die Kontrolle der Datenerhebung in Echtzeit, bietet die Möglichkeit für den Anschluss externer Sensoren wie Bewegungssensor, CTD (Schallprofile) und optischer Rückstrememesser (OBS), Positionsoffsetkorrektur falls ADCP nicht zentrisch unterhalb der GPS-Antenne montiert und eine Reprozessierung der Navigationsdaten, fall diese im Postprozessing korrigiert wurden
- ViSea Data Presentation Software (DPS): Qualitätskontrolle, Datenmanagement bis hin zur Visualisierung und Strömungsatlas
- ViSea Plume Detection Toolbox (PDT): erlaubt die Abschätzung der Sedimentkonzentration in der Wassersäule in Echtzeit
- ViSea-H Data Acquisition Software (H-DAS): Konfiguration, Datenerhebung und Durchflussberechnungen für ein horizontal angebrachtes ADCP, z.B. an einer Kai-mauer
- ViSea Harbour Control Toolbox (HCT): baut auf dem Modul H-DAS auf und dient zur Echtzeitüberwachung von mehreren horizontalen ADCP's mit einer Alarmfunktion per SMS
- ViSea Lowered ADCP Toolbox (LAT): gestattet die Konfiguration, Datenerhebung bis hin zur Präsentation von geschle%o en ADCP in der Tiefe
- ViSea Quad Beam Toolbox (QBT): Bathymetrievermessung und Auswertung aus den ADCP Bottomtrackinformationen

In der Wissenschaft wird die kostenlose Software **CODAS** (**C**ommon **O**ceanographic **D**ata **A**ccess **S**ystem) verwendet, die von der Universität Hawaii entwickelt worden ist. Sie bietet für die mit VM-DAS (38 bis 300 kHz) erhobenen Daten im Ozean (Tiefe > 50m) an einige Korrekturen durchzuführen, Qualitätsparameter zu bestimmen und weitere Konfigurationen vorzunehmen. Die Daten werden in einer Datenbank gespeichert (Cisewski 2001 und Firing 1995). Die Softwarebibliothek ist in der Programmiersprache C geschrieben und funktioniert unter Matlab oder Python auf Unix- und Windowsrechnern.

(Quelle [http://currents.soest.hawaii.edu/docs/adcp\\_doc/codas\\_setup/hg\\_install.html](http://currents.soest.hawaii.edu/docs/adcp_doc/codas_setup/hg_install.html) am 27.10.2010)

Die Firma General Acoustics e.K. aus Kiel bietet ein Softwarepaket **Log\_aFlow** zur Datenassimilation in ein 2D Strömungsmodell. Hierbei werden zunächst die ADCP-Rohdaten aufbereitet, indem die Qualität dieser Daten über die Herstellerangaben hinaus zellenweise mit hydrodynamischen Bedingungen verglichen werden. Die fehlenden Daten in Raum und Zeit werden durch das Modell interpoliert. Der Durchfluss und die Strömung für jeden Ort zu jedem Zeitpunkt kann ausgegeben werden und z.B. Wirbel sichtbar gemacht werden.

(Quelle: [http://www.generalacoustics.com/products/index\\_logafLOW.html](http://www.generalacoustics.com/products/index_logafLOW.html) am 27.10.2010)

Die Hard- und Software des innovativen Herstellers **SonTek** aus Kalifornien (USA) bietet eine Vielzahl an zusätzlichen Funktionen, ist flexibler bezüglich der Messmodi und verspricht

bessere Qualität im Vergleich zu RDI. Die ADCP's der Serien S5 und M9 besitzen ein vertikales Echolot, um den Fehler des Bottom-Tracks an Hangneigungen und Böschungskanten zu minimieren und die Qualität der Strömungsmessung zu verbessern (Quantum Hydrometrie 2009). Das Modell M9 arbeitet mit drei verschiedenen Frequenzen 3000, 1000 und 500 kHz, die es erlauben, ohne Austausch des ADCP's und ohne Konfigurationsänderungen innerhalb eines Profils bei Tiefen von 0,2 bis 80 m Strömung zu messen. Die Software **RiverSurveyor** bietet darüber hinaus die Fernkontrolle der Messung über Bluetooth oder Funk, handelt die Umschaltung der Korrektursignale für das GPS von RTK, DGPS und stand alone je nach Verfügbarkeit der Korrektursignale und schaltet bei schlechter GPS-Qualität auf die Referenzierung über Bottom-Track automatisch um. Die Vielfalt der Ausgabenformate und Schnittstellen zu weiteren Softwarepaketen sprechen für kundenorientierte Firmenpolitik.

(Quelle: <http://www.sontek.com/riversurveyor-s5-m9.php> am 20.02.2011)

Bei U.S. Geological Survey in der Arbeitsgruppe Sediment Transport Instrumentation wurde ein Matlab-Softwarepaket namens *ADCP-Toolbox* zu Bearbeitung der ADCP-Daten zusammengestellt. Diese Bearbeitung beschränkt sich jedoch auf die Analyse der stationären Messungen mit RDI Geräten und Software von am Gewässerboden verankerten ADCP's und findet daher hier keine Verwendung.

In diesem Grundlagenkapitel wurde erklärt welche Prinzipien, Berechnungen und Annahmen bei einer Strömungsmessung mit einem ADCP vorkommen. Einige Aspekte der Qualität der Messdaten, mögliche Fehlerquellen, Klassifizierung der Geräte nach Einsatzbereichen sowie ein Überblick der Softwarevarianten zum Erheben und Nachprozessieren der ADCP-Daten sind angesprochen worden. In den Kapiteln 3 und 4 werden diese Aspekte detaillierter diskutiert und einige Auswirkungen anhand von Beispielen gezeigt.

### 3 Experimenten- und Datenbeschreibung

Die Datensätze, die in dieser Arbeit verwendet werden, sind während verschiedener Messkampagnen im Zeitraum von 2006 bis 2010 in der Deutschen Bucht erhoben worden, siehe Abbildung 3.1. Es wurden drei verschieden große Messschiffe als Trägerplattformen benutzt und in Abhängigkeit von der Aufgabestellung und dem Messgebiet eingesetzt. Unterschiedliche Hardwarekonfigurationen und Aufbauten sind in diesem Zeitraum verwendet worden. In diesem Kapitel werden die Zielsetzungen der Messkampagnen erläutert, die charakteristischen Strömungsverhältnisse der Messgebiete vorgestellt, einige Auffälligkeiten in den Datensätzen gezeigt sowie daraus resultierende Fragen formuliert. Die Eigenschaften und Genauigkeiten der verwendeten GPS-Geräte sowie für die ADCP-Messung relevanten GPS-Datentelegramme werden in diesem Kapitel kurz erläutert. Die Spezifikationen der verwendeten ADCP-Hard- und Software schließen dieses Kapitel ab.



Abb. 3.1: Lage der drei Messgebiete in der Nordsee. (Hintergrundkarte: maps.google.de)

### 3.1 Messgebiete und Datensätze

In diesem Abschnitt werden die drei Messgebiete und ihre charakteristischen Strömungsverhältnissen vorgestellt. Das erste Gebiet, das Lister Tief, ist ein Gezeitenkanal zwischen dem nördlichen Teil der Insel Sylt und dem südlichen Teil der Insel Rømø. Dieser Kanal ist wegen der Sandbänke im Westen zwar seegangsgeschützt, zeichnet sich aber durch starke Wechselwirkung der Sanddünen am Meeresboden mit den Gezeitenströmen aus. Das zweite Messgebiet ist die Deutsche Bucht. Das in der Abbildung 3.1 markierte Gebiet 2 ist homogen bezüglich der Strömung an der Wasseroberfläche im Umkreis von einigen Kilometern, vergleiche Abbildung 3.2. In diesem Gebiet können aber vertikale Schichtungen auftreten, die auf die Strömungsmessung mit ADCP Einfluss haben. Diese Schichtungen lösen sich z.B. während eines Sturmereignisses auf (vertikale Durchmischung). Der Seegang bewirkt Schiffsbewegungen, die wiederum in den Strömungsdaten zu sehen sind. In der Elbmündung (Gebiet 3) ist der Seegangseinfluss weniger störend, die verschiedenen Strömungsscherungen und Salz bzw. Süßwasserschichtungen wirken sich auf die Güte der ADCP-Strömungsmessung aus. Die Zielsetzung der jeweiligen Messkampagnen, die ausgewählten Datensätze sowie die beobachteten Auffälligkeiten in der Qualität der ADCP-Messungen werden erläutert.

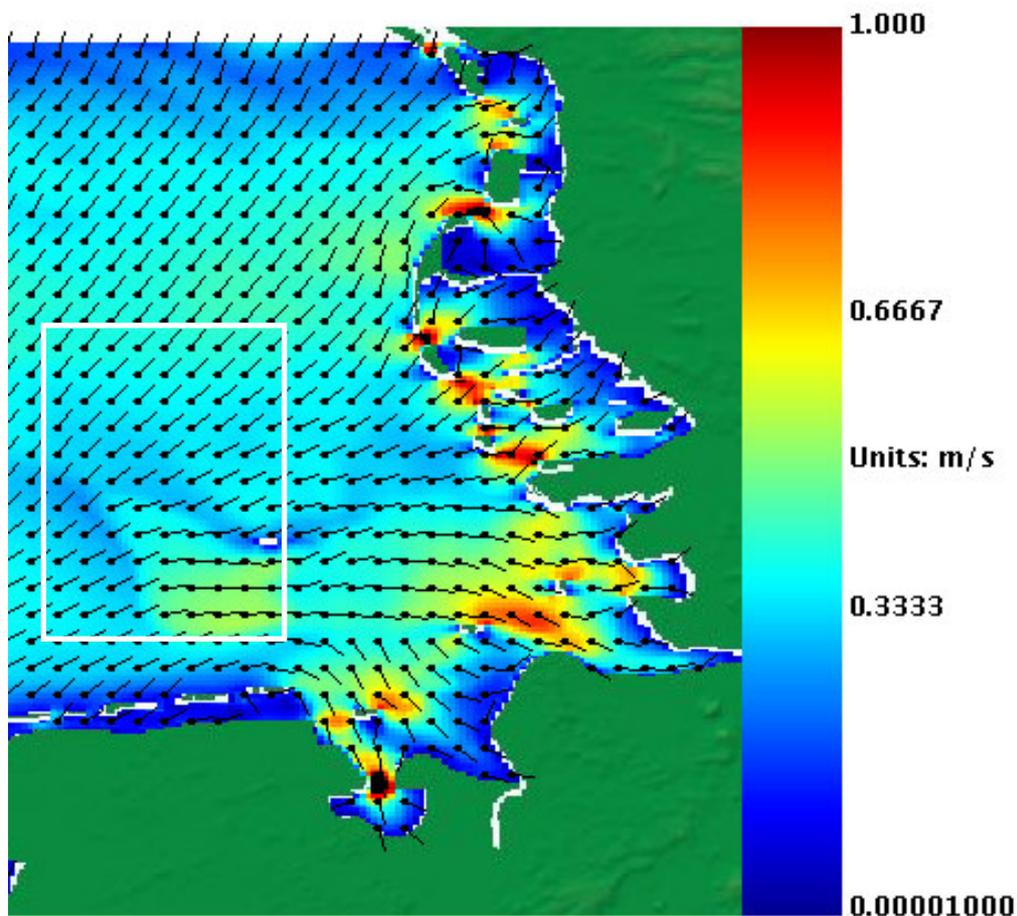


Abb. 3.2: Flutsituation in der Deutschen Bucht. Schnappschuss einer GETM 3D Modellausgabe aus dem COSYNA Portal (HZG). Weißes Rechteck umrandet das Messgebiet 2.

### 3.1.1 Messgebiet 1: Lister Tief

In den Jahren 2006 bis 2008 wurden jeweils in den Monaten Mai und Juni mehrwöchige Kampagnen im *Messgebiet 1*, dem Lister Tief, durchgeführt, siehe Abbildung 3.1. Dieses Gebiet liegt zwischen den Inseln Sylt und Rømø (Dänemark) und zeichnet sich durch starke Wechselwirkungen der Gezeitenströme und der Bathymetrie aus, siehe Abbildung 3.5a. Bereits in den Jahren 2002 und 2003 wurde dieser Gezeitenkanal mit ADCP zu verschiedenen Tidephasen vermessen. In (Prinz 2003) wurden die hydrodynamischen Wechselwirkungen des Flut- und Ebbstroms mit den am Meeresboden liegenden Sandbänken (Abbildung 3.3a), die bis zu 11 m Höhe und 220 m Länge erreichen können, ausführlich beschrieben.

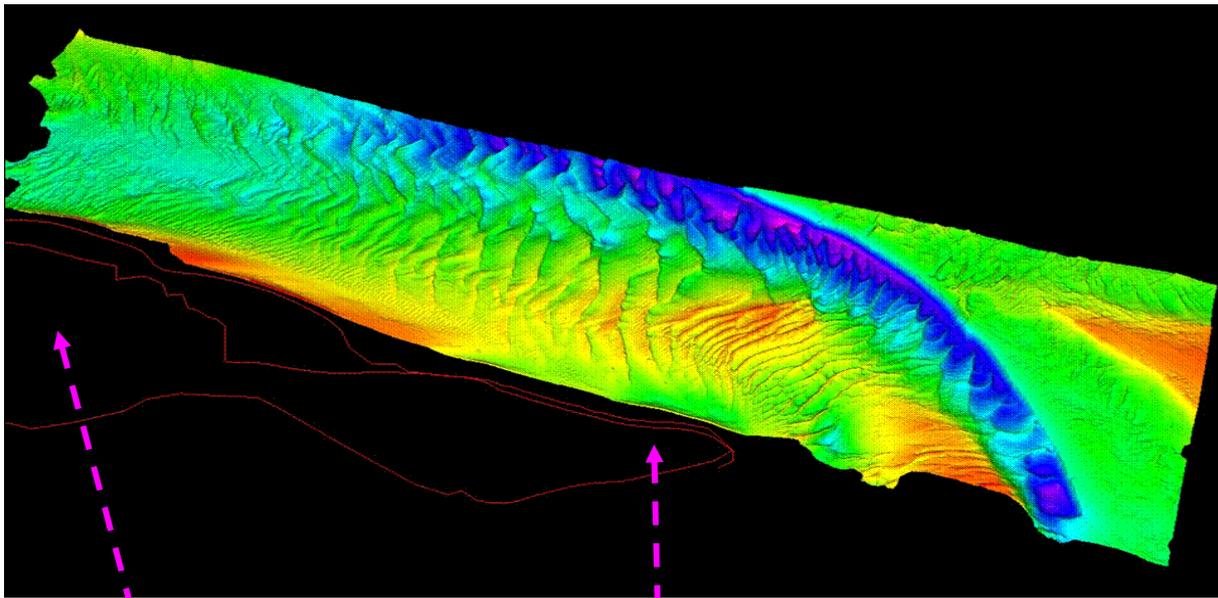


Abb. 3.3a: Digitales Geländemodell des Tidekanals Lister Tief berechnet aus Fächerecholotdaten auf 2 m Raster. (Quelle KOK/HZG)

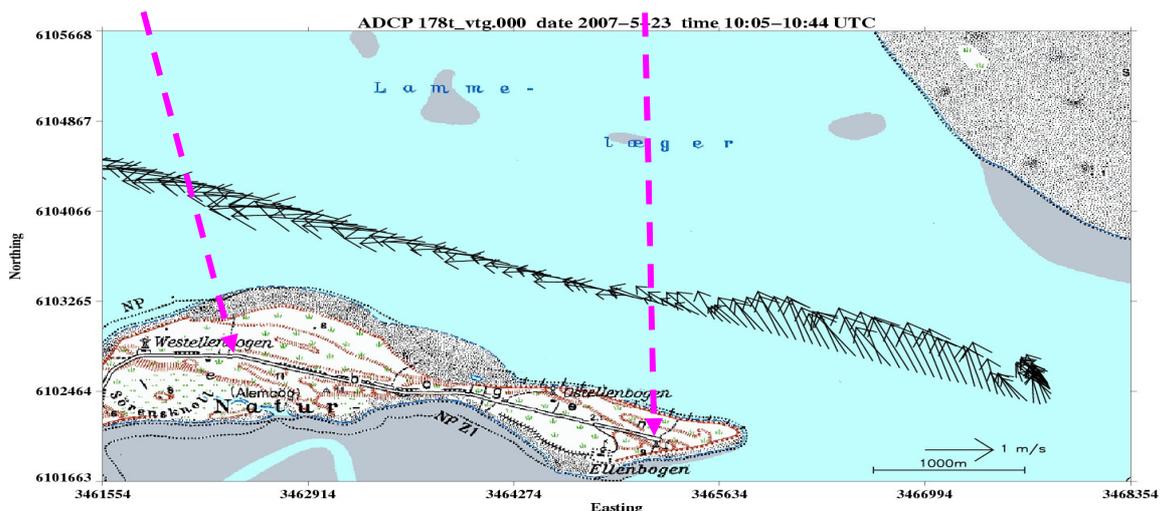


Abb. 3.3b: Lage des Profils 178 vom 23.05.2007 im Messgebiet 1 Lister Tief. Die Vektorpfeile aus der Tiefe 2,5 m unterhalb der Wasseroberfläche zeigen die horizontale Änderung des Strömungsfeldes im Messgebiet bei Ebbe. Hintergrundkarte aus TOP50 Schleswig-Holstein und Hamburg.

Das Massenerhaltungsgesetz (Kontinuitätsgleichung) besagt, dass die Masse eines fluiden Körpers in einem geschlossenen Volumen konstant ist. Beim Überströmen der hohen Sandbänke durch die Wassermassen verengt sich der Querschnitt des Kanals, was zur Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit führt. Nach dem Passieren des Sandbankkammes vergrößert sich wieder der Querschnitt und die Strömungsgeschwindigkeit nimmt ab. Diese Effekte nennt man auch Konvergenz und Divergenz (Kalle & Dietrich 1992), die in der Abbildung 3.4 schematisch dargestellt sind. Die Zonen der Beschleunigung und Verlangsamung sind bereits im Betrag der horizontalen ADCP-Strömung sichtbar, siehe Abbildung 3.5.

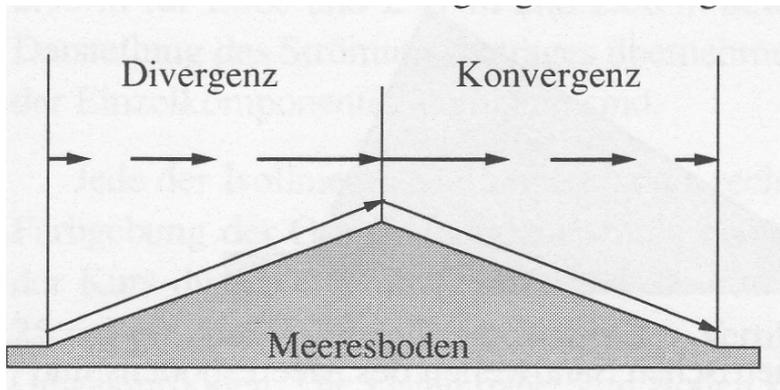


Abb. 3.4: Konvergenz und Divergenzzonen der Strömung über Sandwellen. (Prinz 2003)

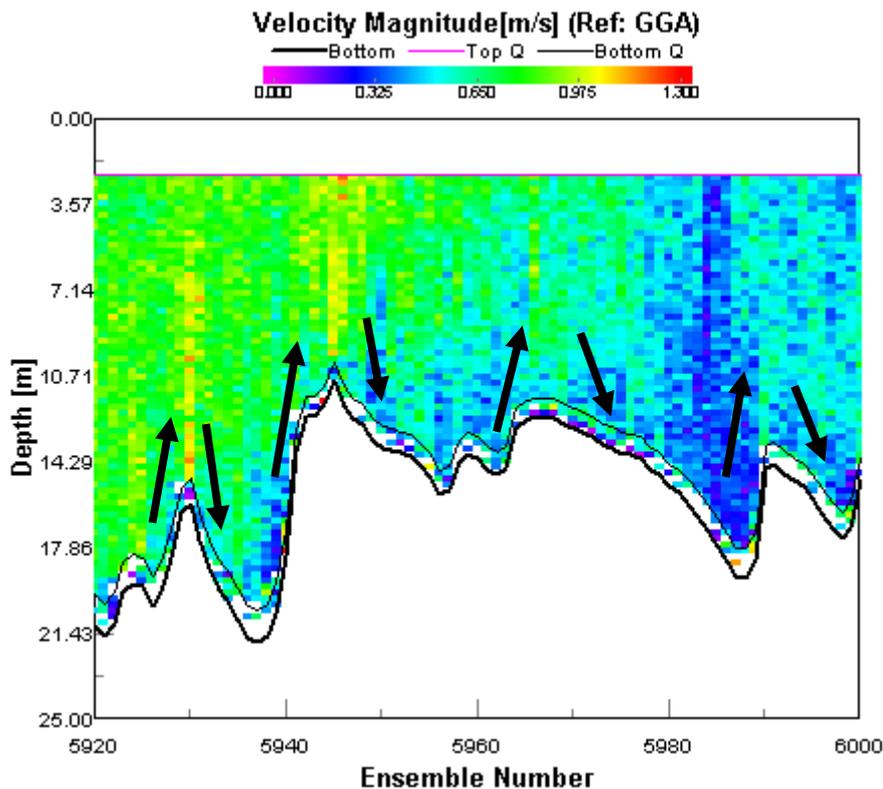


Abb. 3.5a: Betrag der horizontalen Strömung als vertikaler ADCP-Schnitt durch die Wassersäule aus dem Profil 178 vom 23.05.2007 im Messgebiet 1 Lister Tief bei Ebbe. Bereiche von Beschleunigung über den Kämmen der Sandbänke sowie eine Verlangsamung der Strömung dahinter sind erkennbar. Mit schwarzen Pfeilen sind die Änderungen der Richtungen in der vertikalen Komponente angedeutet. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

Die Änderungen der Strömungsrichtung nach oben vor dem Dünenkamm und die Senkung hinter dem Kam, sind in der vertikalen Komponente zu sehen, vergleiche Abbildung 3.5a und den Anhang D mit allen relevanten Plots zu diesem Profil. Diese hydrodynamischen Effekte reichen bis zur Wasseroberfläche und verursachen eine Änderung ihrer Rauigkeit, die ebenfalls mit dem menschlichen Auge erkennbar ist. Die Lage dieser Rauigkeitskanten ist aufgrund der Strömung räumlich versetzt. In Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit, dem Gradienten in der Bathymetrie sowie des Wasserstandes verdriften diese Effekte räumlich. Dieser Versatz heißt *Advektion* und muss berücksichtigt werden, wenn die Radardaten und die Bathymetrie direkt miteinander verglichen werden (Prinz 2003).

Dadurch, dass sich diese hydrodynamischen Effekte bis zur Wasseroberfläche hin auswirken, können die Strömungsänderungen (Betrag und Richtung) an der Wasseroberfläche mit dem Radar Doppler Current Profiler (*RDCP*) hochauflösend vermessen werden, siehe Beispiel im Anhang F1. Dieses radarbasierte Messsystem *RDCP* befindet sich in der Entwicklung und muss anhand von zusätzlichen Kalibrierungsmessungen in der Qualität und Zuverlässigkeit der berechneten Strömungskarten noch erheblich verbessert werden (Cysewski et al. 2010). Der Einfluss des Windes auf die Strömung der Grenzschicht Luft-Wasser (Winddrift) und die Winkelabhängigkeit der Dopplerverschiebung der Radarwelle bei der Rückstreuung an der rauen Wasseroberfläche muss noch genauer untersucht werden. Hierzu wurde das Schiff am Ende von Profilen, wie z.B. in der Abbildung 3.3b dargestellt, aufgestoppt und Radarmessungen mit wechselnder Blickrichtung der Radarantenne in 20° Schritten genommen. Für diese stationäre Kalibrierungsmessung ist die Kenntnis der Strömungsverhältnisse und ihrer Variation im *Scanbereich* des Radars (maximale Reichweite von einer Seemeile mit einer Zellauflösung von 7,5 m) zwingend notwendig. Die Drift des Schiffes, sowie die mittlere ADCP-Strömung unter dem Schiffboden werden subtrahiert, um ausschließlich den Einfluss des Windes auf die Radarmessung in Abhängigkeit der Radarantennenblickrichtung zur Windrichtung und der Entfernung (~ Depressionswinkel) bestimmen zu können, siehe Abbildung G2 im Anhang. Die Größe des Scanbereichs des Radars hängt von der Antennenaufbauhöhe und der Windstärke ab und kann maximal bis zu einer Seemeile betragen. Es ist ebenfalls wichtig, dass diese Kalibrierungsmessungen in strömungshomogenen Gebieten erfasst werden. Diesbezüglich müssen Analysen der ADCP-Längsprofile unternommen werden. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit, die bei diesen Kalibrierungen bis dato aus der Tiefenschicht 2,5 m bis 3,5 m unterhalb des ADCP-Kopfes genommen wurde, stimmt im Allgemeinen nicht exakt mit der Strömung an der Wasseroberfläche überein. Dieser nicht messbare Bereich oberhalb des ADCP-Schwingerkopfes muss analog zur Bestimmung der Durchflussmessungen, durch Parametrisierung der gemessenen Strömung über die gesamte oder Teile des Tiefenbereiches mit einer anschließenden Extrapolation abgeschätzt werden, Details im Kapitel 5.

Betrachtet man die unterschiedlichen Strömungswerte in einem und demselben ADCP-Längsprofil aus dem Messgebiet Lister Tief, die nur aufgrund der unterschiedlichen Referen-

zen bei der Nachprozessierung der ADCP-Messung entstehen, siehe Abbildung 10, stellen sich in diesem Zusammenhang folgende Qualitätsfragen:

**Frage 1:** Welche Referenz Bottom Track, GPS-GGA oder GPS-VTG ist geeigneter für die ADCP-Messung in den drei Messgebieten?

**Frage 2:** Welche Form der Parametrisierung der Strömung in der Wassersäule ist geeigneter im Bezug auf die Extrapolation zur Wasseroberfläche in Gebiet Lister Tief?

**Frage 3:** Ist das Teilgebiet, in dem die Radarkalibrierungsmessung durchgeführt wurde, homogen bezüglich der Strömung?

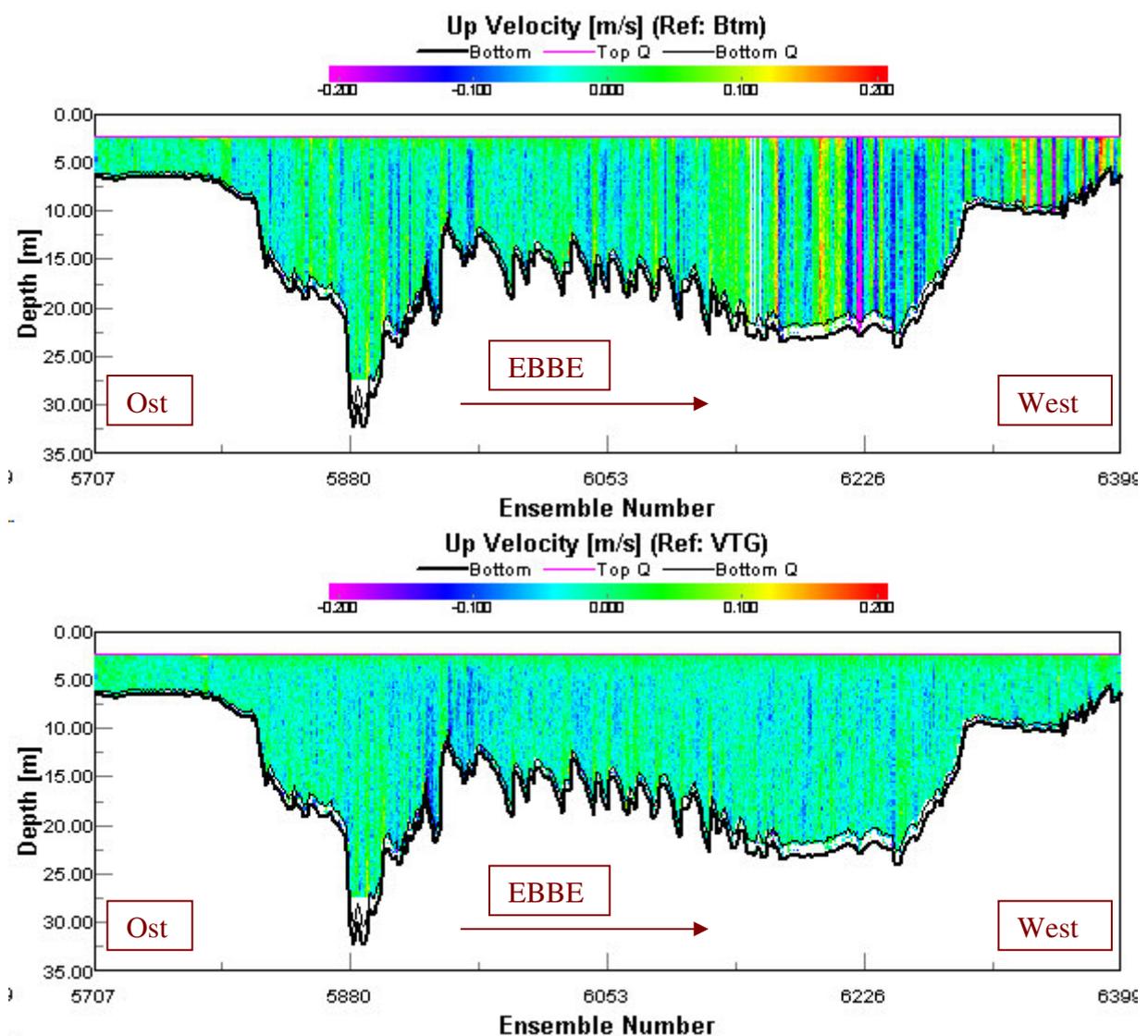


Abb. 3.5b: Vertikale Strömungskomponenten aus dem ADCP-Profil 178 vom 23.05.2007 im Messgebiet 1 Lister Tief bei Ebbe zeigen Änderung der Strömungsrichtung in der Vertikalen: nach oben vor dem Dünenkamm und nach unten hinter dem Kamm. Die Verwendung von unterschiedlichen Referenz Bottom-Track (oberes Bild) und GPS-VTG (unten) führt offensichtlich zu unterschiedlichen Messergebnissen. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

Von der Antwort auf die erste Frage hängt nicht nur die Messgenauigkeit des RDCP's sondern auch die Zuverlässigkeit der ADCP-Daten ab, die für die Validierung des RDCP's benutzt werden. Diese Daten stammen von einer Schlauchbootmessung und erfassen fast die gesamte Wassersäule von oberflächennaher Strömung (ca. 0,5 m unterhalb der Wasseroberfläche) bis zum Meeresboden. Das Schlauchboot *Onkel Herbert* ist zeitversetzt (wenige Minuten später) in verschiedenen Entfernungen, parallel zu dem Schiff *L.Prandtl*, auf dem das RDCP installiert war, durch das Messgebiet gefahren. Unter genauer Betrachtung der Qualität der ADCP-Schlauchbootmessung stellt man eine starke Verrauschung der Messwerte im Vergleich zur Prandtlmessung fest sowie auffällig viele unplausible (bezüglich des Wertebereichs) vertikale Strömungskomponenten, die durch die Wahl der Referenzen entstehen, vergleiche hierzu Abbildung 3.6 und den Anhang D1 mit allen relevanten Plots zu diesem Profil. An dieser Stelle muss folgende Frage gestellt werden:

**Frage 4:** Weshalb sind die ADCP-Schlauchbootmessungen mit baugleichem ADCP-Gerät in demselben Messgebiet verrauschter im Vergleich zu der Prandtlmessung?

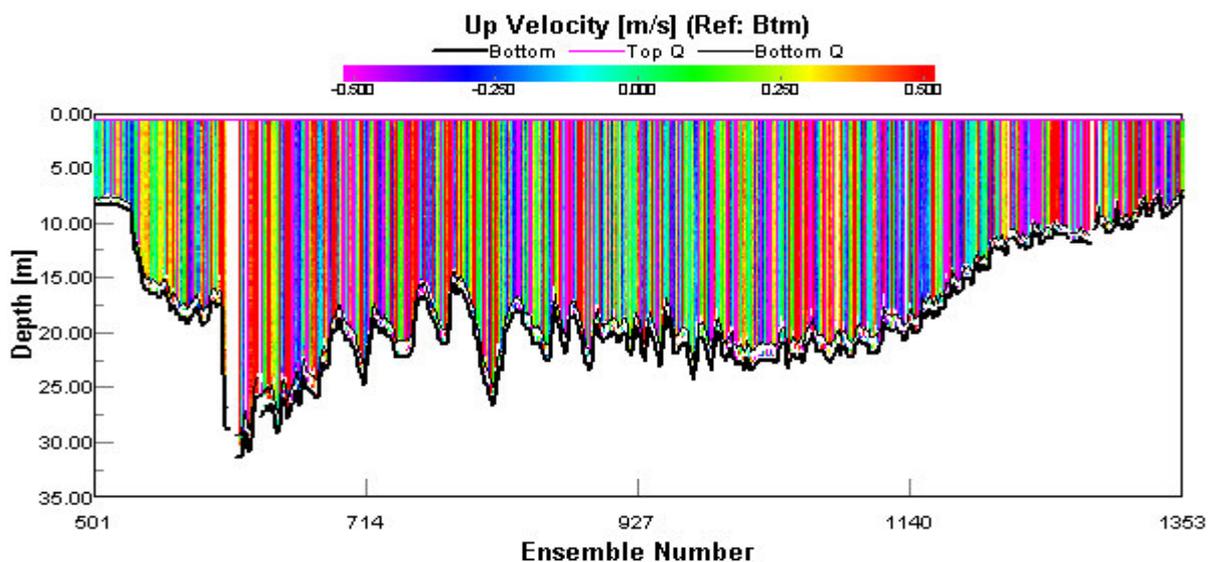


Abb. 3.6: Vertikale Strömungskomponenten referenziert über Bottom Track (BTM) aus dem Schlauchboot-ADCP-Profil 003 vom 22.05.2007 im Messgebiet 1 Lister Tief bei Ebbe. Die hydrodynamischen Effekte wie in der Abbildung 3.5 sind nicht erkennbar. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

### 3.1.2 Messgebiet 2: Deutsche Bucht

Während der Herbstmesskampagnen 2008 bis 2010 wurden jeweils im September für das Projekt *Integrated Coastal Observatory North Sea (ICON)* und das Folgeprojekt *Coastal Observing System for Northern and Arctic Seas (COSYNA)* mit verschiedenen Sensoren Umweltparameter wie Salzgehalt, Temperatur, Schwebstoffe, Trübung, Strömung, Seegang u.v.m. in der Deutschen Bucht gemessen.

Aus der ADCP-Strömungsmessung wurden zwei Profile ausgesucht, die jeweils für die Kalibrierung des RDCP's und der Validierung von HF-Messungen relevant sind. Diese Beispiele zeigen jedoch einige Effekte, die als Störung in der Messung identifiziert wurden und ohne Nachbearbeitung nicht in die Radardatenprozessierung einfließen können. Der erste interessante Datensatz wurde während der Messkampagne September 2008 auf dem Forschungsschiff *Heincke* westlich vor Helgoland erhoben, siehe Abbildung 3.7 und den Anhang D4 mit allen relevanten Plots zu diesem Profil. In diesem Datensatz sieht man Schichtungen in der Wassersäule, die die leistungsschwachen Ultraschallwellen des Flachwasser-ADCP's verhindert haben die Strömung innerhalb der Schichtung zu messen, vergleiche auch Abschnitt 2.8. Der lange Puls des Bottomtrackings wurde durch diese Schichtung nicht behindert und detektierte stetig den Meeresboden. Die Strömungsgeschwindigkeiten, die in Bodennähe hier ausgegeben werden, liegen im Bereich der Einwirkung von den Nebenkeulen. Die vertikalen roten Striche (Betrag der Strömung  $> 1,2$  m/s) entstanden durch Aussetzer im Schiffskurs. Die betroffenen Ensembles müssen aus der Datenprozessierung ausgenommen werden, mehr hierzu im Kapitel 4. An dieser Stelle muss die zentrale Frage gestellt werden:

**Frage 5:** Ist es Zulässig ein unvollständiges Vertikalprofil zu parametrisieren und anschließend bis zur Wasseroberfläche zu extrapolieren?

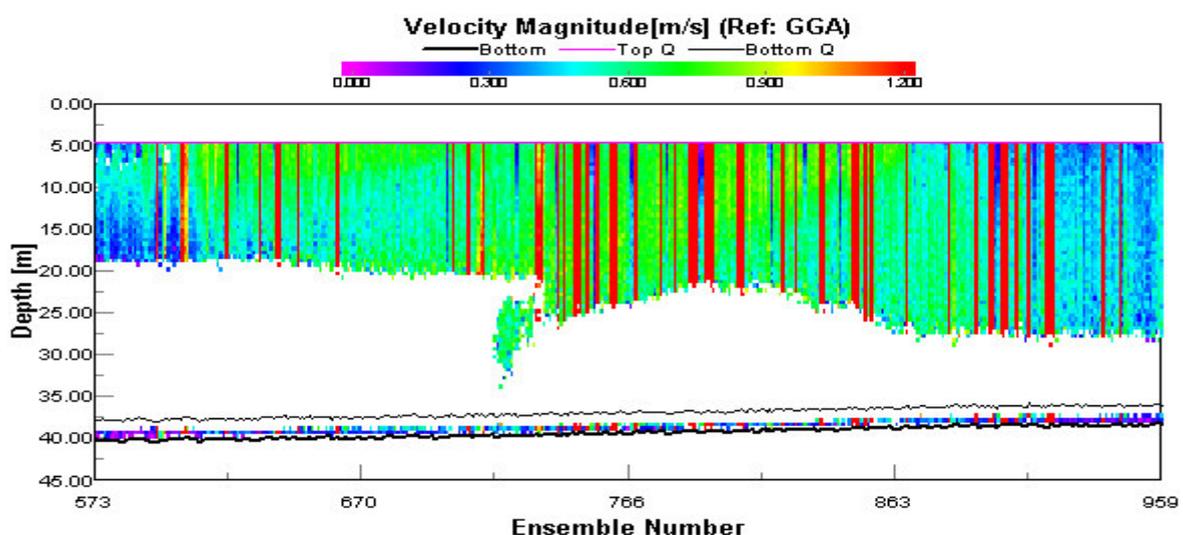


Abb. 3.7: Horizontale Strömungskomponenten aus dem Profil 021 vom 09.09.2008 erhoben westlich vor Helgoland. Schichtungen in der Wassersäule verhinderten das 1200kHz ADCP die Strömung bis zum Meeresboden zu messen. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver

Diese Schichtungen wurden beim Vorliegen von Starkwindereignissen nicht mehr beobachtet. Im Seegang rollte und stampfte das Forschungsschiff Heincke. Der ADCP-Datensatz mit der Nummer 140 vom 23.09.2009 wurde im Messgebiet 2 zwischen Helgoland und der Wesermündung erhoben, siehe Abbildung 3.8 und 3.9 sowie weitere Plots im Anhang D5. In diesem Gebiet ändert sich die Strömung räumlich nicht so stark wie im Messgebiet 1, dem Lister Tief. Auf einer Entfernung von 50 m (~ zwei Ensembles) können daher keine Gradienten in der Strömung auftreten, die ADCP-Messergebnisse weisen sichtbare Sprünge in der horizontalen Strömungskomponente (von 1,3 auf 0,5 m/s) auf und das zwischen zwei benachbarten Ensembles. Die zusätzliche Betrachtung der vertikalen Strömungskomponente in Abhängigkeit von der Referenz (BTM und GPS) führt zu einer weiteren Frage:

**Frage 6:** Welchen Einfluss hat die Plattformbewegung auf die ADCP-Messung und wie ist der Zusammenhang dieser Bewegung zu der Referenz?

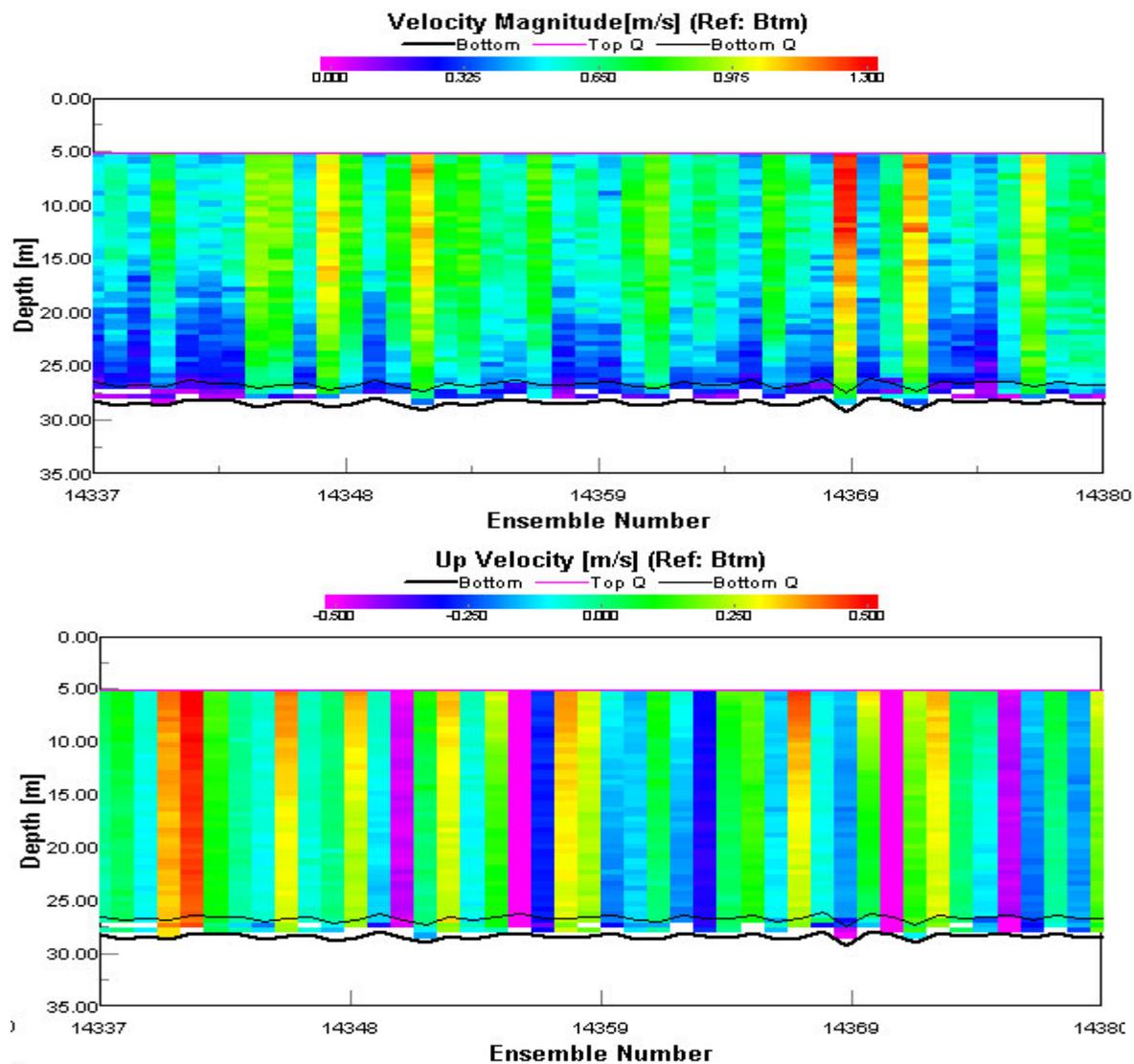


Abb. 3.8: Horizontaler Betrag und die vertikale Strömungskomponente aus dem Datensatz 140 vom 23.09.2009 erhoben im Messgebiet 2 zwischen Helgoland und der Wesermündung. Referenziert über **Bottom-Track**. Bewegung des Schiffes im Seegang verursachen offenbar Artefakte im Strömungsfeld. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

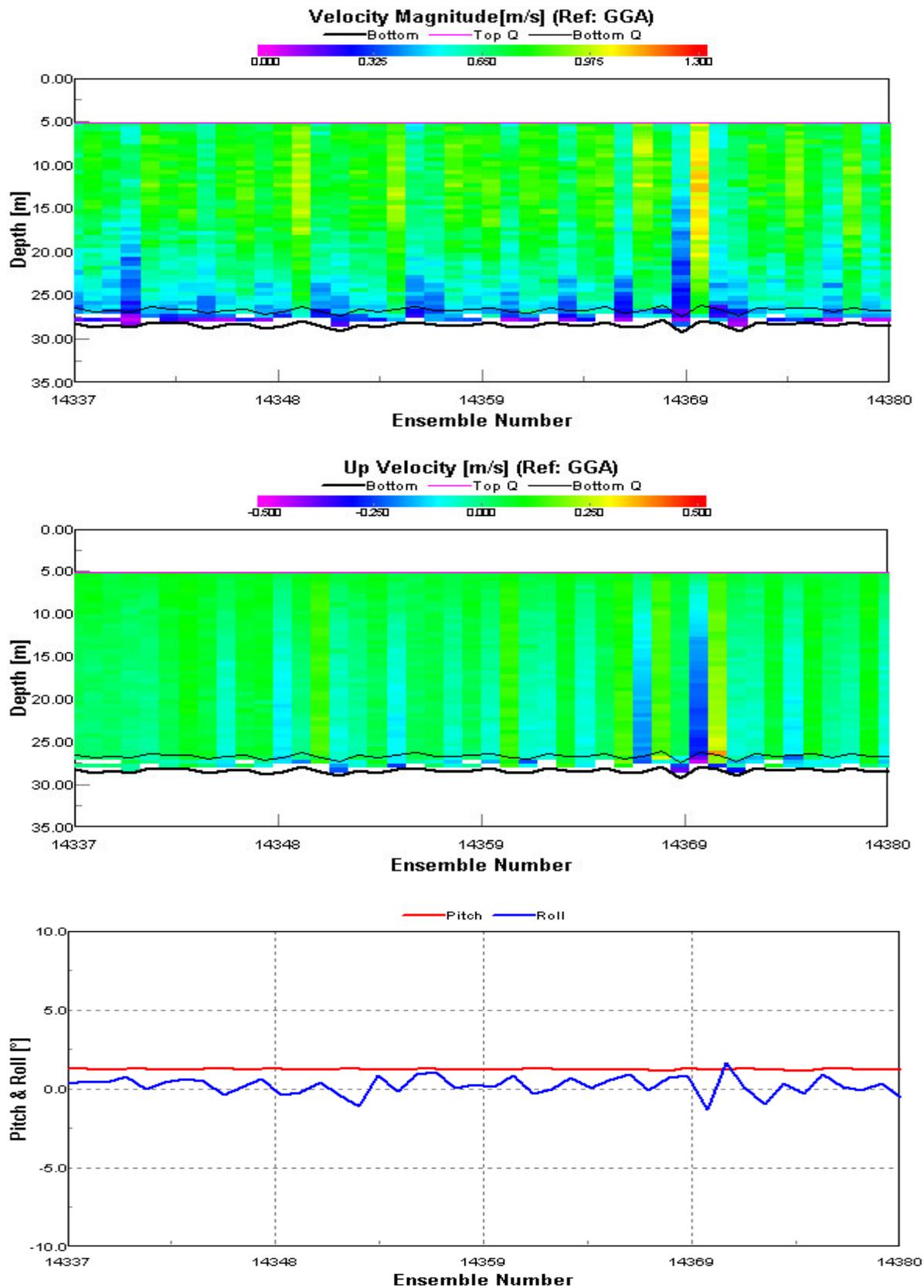


Abb. 3.9: Horizontaler Betrag, die vertikale Strömungskomponente sowie Roll- und Stampfwinkel aus dem Datensatz 140 vom 23.09.2009 erhoben im Messgebiet 2 zwischen Helgoland und der Wesermündung. Referenziert über **GPS-GGA**. Bewegung des Schiffes im Seegang verursachen offenbar Artefakte im Strömungsfeld, sie fallen aber geringer aus als im bei der Verwendung der Referenz Bottom-Track wie in Abb. 3.8 dargestellt. Schnapsschuss aus dem Programm WinRiver.

### 3.1.3 Messgebiet 3: Elbmündung

Im September 2009 und im Mai 2010 wurden zusätzlich die Strömungsverhältnisse der Elbmündung sowie zwischen den umliegenden Sandbänken nördlich von Cuxhaven vermessen. Dieses Gebiet Nr. 3 zeichnet sich durch starke Änderungen der Strömungsverhältnisse innerhalb kurzer Distanzen aus, Scherströmungen und Schichtungen (Salz- und Süßwasser) treten auf. Dieses Gebiet unterliegt hoher morphologischer Dynamik (Baggerung und Verklappung). Die Tatsache, dass der Sensor zur Bestimmung von Temperatur, Salzgehalt und Schallgeschwindigkeit im Wasser defekt war, zwingt zu Beantwortung folgender Frage:

**Frage 7:** Besteht die Möglichkeit die Schallgeschwindigkeit abzuschätzen und wenn ja, welche Unsicherheit folgt für die Strömungsbestimmung?

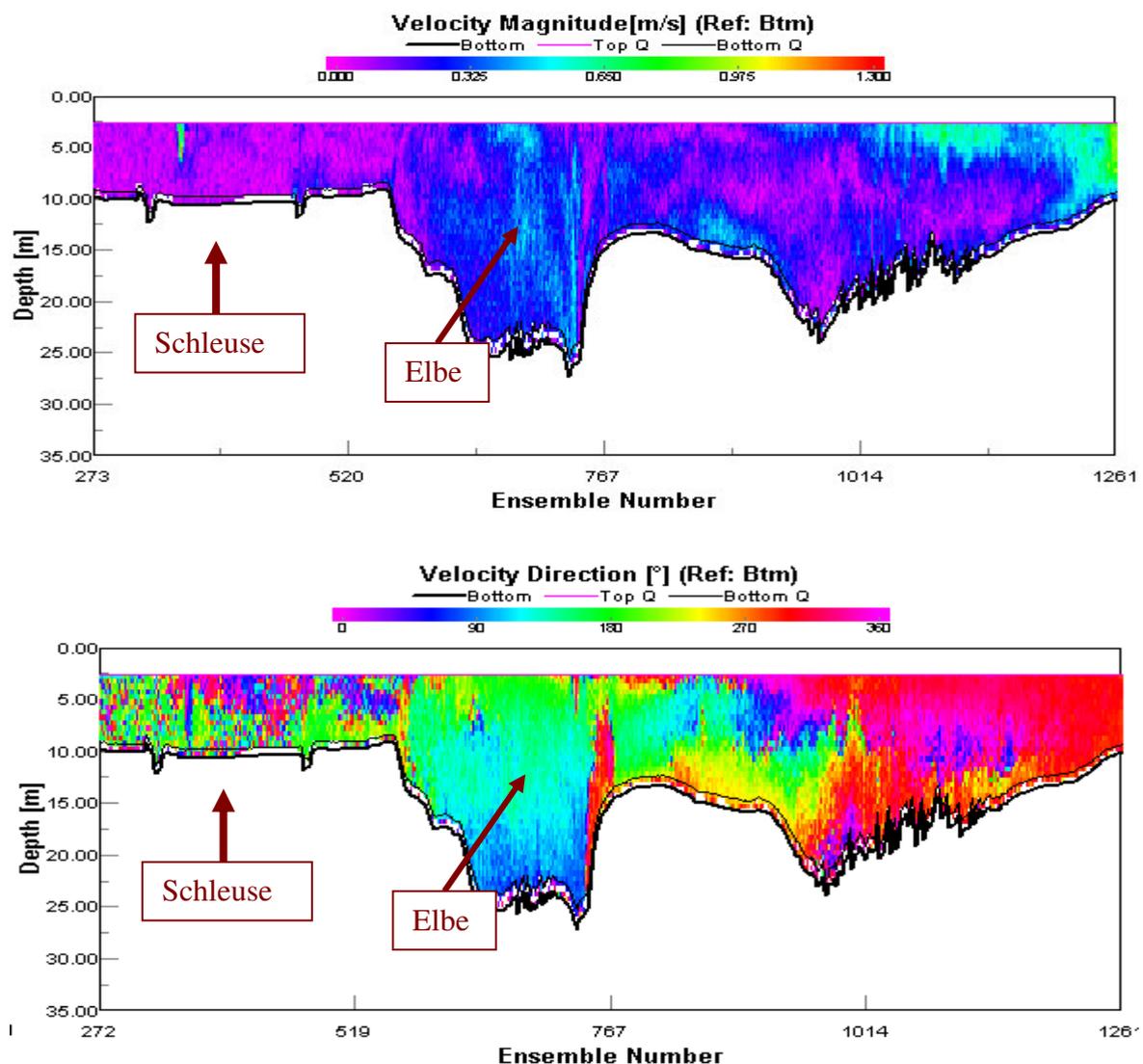


Abb. 3.10: Horizontaler Betrag (oben) und horizontale Richtung (unten) der Strömungskomponenten aus dem Datensatz 041 vom 06.06.2010 erhoben im Messgebiet 3 in der Elbmündung. Das Messschiff verlässt die Schleuse, überquert die Elbe und fährt die Elbe abwärts bis zum Piel Zehnerloch nördlich von Cuxhaven. Die Komplexität der Strömungsverhältnisse ist im Richtungsplot deutlich zu sehen. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

### 3.2 Trägerplattformen und Sensoraufstellung

Die Messkampagnen auf der offenen Nordsee wurden mit dem Forschungsschiff *Heincke* durchgeführt. Dieses Schiff wird von dem Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) betrieben und hat eine Gesamtlänge von fast 55 m, eine Breite von 12,5 m und einen Tiefgang von 4,16 m, siehe Abbildung A1 im Anhang. Sowohl das 1200 kHz als auch das 600kHz ADCP werden an Bord der *Heincke* in einem Schacht (Moon Pool) eingesetzt, der sich in der Mitte des Schiffes befindet und zum Schiffsboden führt. Die Navigationsdaten stammen aus dem Zweifrequenz-GPS-Gerät Javad Gyro-4T, das neben der Position auch den Schiffskurs (heading), die Geschwindigkeit und den Kurs über Grund sowie die Bewegung der Plattform wie Rollen und Stampfen, siehe auch Abbildung 3.11 ausgegeben hat. Details zum Gerät und der Konfiguration im Abschnitt 3.3.

Bevor das Javad Gyro 4T auf den Messschiffen erfolgreich eingesetzt werden konnte, wurde ein Zweifrequenz-GPS mit zwei Antennen des Herstellers Ashtech vom Typ Aquarius-22 eingesetzt. Mit diesem Gerät wurden die Strömungsmessungen mit dem HZG (ehemals GKSS) eigenen Forschungsschiff *Ludwig Prandtl*, siehe Abbildung A2 im Anhang, in dem Messgebieten 1 Lister Tief erhoben, vergleiche Abbildung 3.1. Dieses Gerät liefert die Position, Heading und je nach Aufstellung relativ zur Schiffsachse entweder das Rollen oder das Stampfen der Plattform. Das Messschiff *L. Prandtl* hat eine Länge von 31 m und einen Tiefgang von ca. 1,7 m. Die relativen Positionsoffsets aller Messsysteme an Bord der *Prandtl* wurden bei einem Werftaufenthalt terrestrisch mit einer Totalstation (Theodolit mit Entfernungsmesser) bestimmt. Das ADCP wird hier ebenfalls in einem Moon Pool montiert.

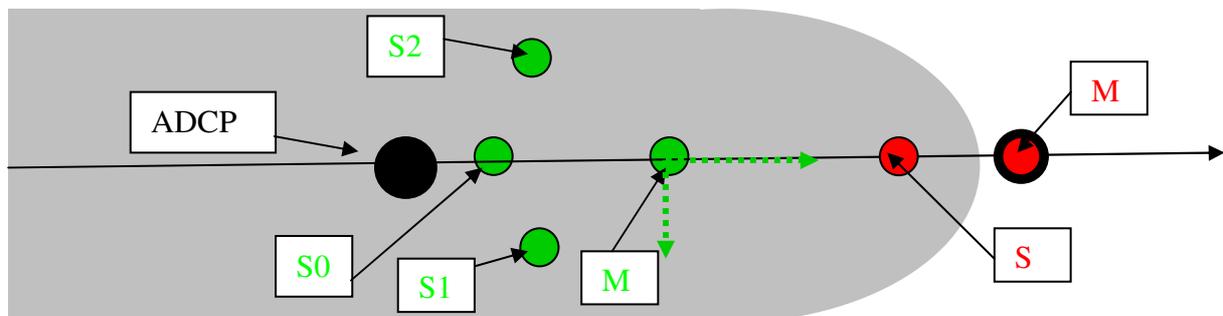


Abb. 3.11: Schematische Darstellung der Positionsoffsets des ADCP's (schwarz) relativ zur GPS-Antennen (Javad in grün) auf den Forschungsschiffen *Heincke*, *L. Prandtl* sowie dem Messboot *Onkel Herbert* (Ashtech in rot). *M* steht jeweils für die GPS-Masterantenne, *S* für GPS-Slaveantenne bei Ashtech und *S1* bis *S3* für die Slaveantennen des Javads.

Das Ashtech GPS-Gerät ist zweifach vorhanden und wurde ebenfalls zur begleitenden Strömungsmessung vom Schlauchboot aus eingesetzt. Für das HZG Messboot *Onkel Herbert* wurde eine spezielle Halterung konstruiert, die das ADCP am Bug in einer Entfernung von ca. 1 m von dem Schiffkörper direkt unterhalb der Wasseroberfläche hält. Die Schwingereintauchtiefe beträgt während der Fahrt lediglich ca. 0,2 m.

Die verschiedenen Positionsoffsets der GPS-Masterantennen relativ zum ADCP sind in der Tabelle 3.1 zusammengetragen. Wie bereits erwähnt, sind während der Messkampagnen verschiedene Typen von ADCP's und GPS- Navigationsgeräten eingesetzt worden. In der Tabelle 3.2 sind einige Spezifikationen zusammengestellt.

<b>Plattform</b>	<b>Offests relativ zur GPS-Master in Metern</b>				
	Längs	Quer	Vertikal	Eintauchtiefe	Messkampagne
Heincke Javad	-19,0	0,0	17,3	4,1	Sept 2008 + 2009
Heincke Ashtech	-6,0	-8,0	16,1	4,1	Sept 2010
L.Prandtl Javad	-7,3	-0,6	8,0	1,7	Mai 2010
L.Prandtl Ashtech	-7,1	0,6	7,0	1,7	Mai 2003 bis Mai 2009
Onkel Herbert	0,0	0,0	1,55	0,2	2007 bis 2010

Tabelle 3.1: Positionsoffsets der GPS-Masterantenne relativ zu ADCP-Schwinger bei verschiedenen Einsätzen.

Plattform	L.Prandtl		Onkel H.	FS Heincke	
	2006 bis 2009	2010	2007	2008 bis 2009	2010
GGA [Hz]	1	1	1	1	1
VTG [Hz]	1	1	1	1	1
HDT [Hz]	5	5	5	5	5
HRP [Hz]	5	10	5	10	10
RTK	x		x		
Beacon		x	x		x
Stand alone				x	
Ashtech Aquarius 22	x		x		x
Javad Gyro 4T		x		x	
ADCP in [kHz]	1200	1200	1200	1200	600

Tabelle 3.2: Zusammenstellung der Datenausgabefrequenz in Hz der NMEA-Protokolle beider GPS-Geräte, Information über die verwendeten Korrektursignale für die Positionsbestimmung. Aufschlüsselung welcher ADCP-Typ in Kombination mit welchem GPS-Gerät bei welcher Messkampagne verwendet wurde.

### 3.3 GPS-Navigation

Da diese Arbeit auch von Nicht-Geodäten gelesen wird, werden die Grundlagen der GPS-Technik, die Spezifikationen der benutzten GPS-Geräte und die benutzten GPS-Datentelegramme kurz vorgestellt, sodass die Details im Kapitel 4 einfacher nachzuvollziehen sein sollten.

#### 3.3.1 GPS-Grundlagen

Das Akronym *GPS* steht für Global Positioning System und wurde durch das U.S.-Militär bereits in den 1960-ern unter dem Namen NAVSTAR/GPS in Betrieb genommen. Dieses System basiert auf 24 Satelliten, die sich auf sechs fast kreisförmigen Bahnen mit einer Inklination von  $55^\circ$  gegenüber dem Äquator, in einer Höhe von ca. 20000 km befinden und für einen Umlauf ca. 12 Stunden benötigen. Das Ziel ist es weltweit zu jedem Zeitpunkt und bei jedem Wetter eine drei-dimensionale Position (Neupunkt) und die Geschwindigkeit bestimmen zu können (Kahmen 1997). Diese Positionsbestimmung basiert auf einem räumlichen Bogenschnitt wobei die geozentrischen Positionen der Satelliten bekannt sind und die Entfernungen zwischen dem Satellit und dem Empfänger (GPS-Antenne) aus der Laufzeit zunächst bestimmt werden müssen. Durch die Korrelation des Satellitensignals (Binärcode) und der im Empfänger erzeugten Kopie dieses Codes wird der Aussendezeitpunkt des Signals am Satelliten und der Empfangszeitpunkt miteinander verglichen. Aufgrund der Tatsache, dass die Uhren im Satellit und im Empfänger nicht synchronisiert sind, enthält die aus der Signallaufzeit abgeleitete Distanz (*Pseudostrecke*) einen systematischen Fehler, der als Uhrenfehler bezeichnet wird und zusätzlich zu den 3D-Koordinaten als unbekannte Größe bestimmt werden muss (VDV 1995). Dies ist der Grund warum für jede Positionsbestimmung vier Satelliten benötigt werden.

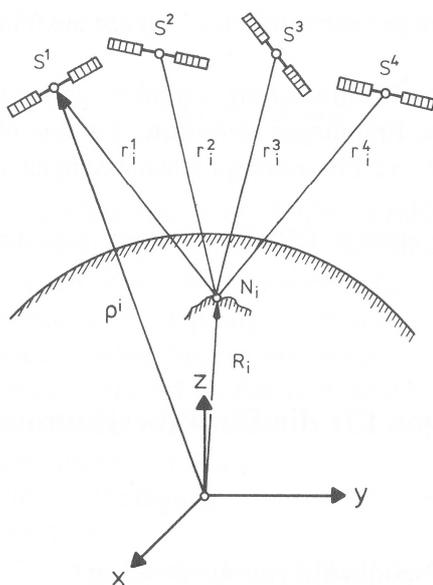


Abb. 3.12: Positionsbestimmung eines Neupunktes mit GPS. (Kahmen 1997)

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung mittels GPS hängt von vielen Faktoren ab wie z.B. Qualität der Empfängeruhr (Kostenfrage), Position des Satelliten (Ephemeriden Prädiktionsfehler), ionosphärischen und troposphärischen Verzögerungen, Mehrwegeausbreitung oder dem Rauschen des Empfängers (Kahmen 1997). Aufgrund der Laufzeitverzögerungen des GPS Signals, die in dem dispersiven Medium Ionosphäre frequenzabhängig sind, kann durch die Benutzung beider GPS-Trägerfrequenzen L1 = 1575,42 MHz und L2 = 1227,60 MHz dieser Fehler zum größten Teil eliminiert werden. Zusätzlich zu der Verwendung beider Frequenzen können über die Elevationsmaske am Empfänger diejenigen Satelliten, die sich sehr niedrig am Horizont befinden ( $< 5^\circ$  bis  $10^\circ$ ) und dadurch den längsten Weg durch die Ionosphäre haben, aus der Positionsbestimmung ausgeschlossen werden. GPS-Geräte, die beide Frequenzen empfangen können, nennt man Zweifrequenz-GPS-Empfänger. Eine Minimierung der Störeinflüsse auf die GPS-Positionsbestimmung wird durch die Verwendung von GPS-Korrekturdaten erreicht. Diese Korrekturdaten werden meist durch fest installierte *Referenzstationen* (auch *Base* genannt) auf bekannten Vermessungspunkten berechnet und per Radiowelle, GSM/GPRS oder das Internet zur Verfügung gestellt. Verrechnet der GPS-Empfänger (auch *Rover* genannt) diese Fehlerkorrekturen bei der Positionsbestimmung des Neupunktes, erhöht sich die absolute Genauigkeit der 3D-Koordinaten. Diese Genauigkeit hängt von der Entfernung zu der Referenzstation ab, da bei größeren Entfernungen andere geometrische (Satellitenkonstellation über dem Rover) und meteorologische Bedingungen auftreten. Die Homogenität diesbezüglich wird angenommen.

<i>Modus</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Qualitäts-Indikator</i>	<i>Lagegenauigkeit</i>
Stand alone, keine Korrekturen	GPS	0 bis 3	4-20 m
Einfaches Differential (Beacon), Korrekturen von z.B. Helgoland oder Wustrow	DGPS	6 bis 9	0,5-4 m
Erweitertes Diff., Korrekturen von eigener Ref.-Station, schlechter Empfang oder wenig Satelliten	EDGPS	10 bis 13	0,10-1,5 m
Echtzeit Kinematik, Empfang der eigenen Ref.-Station	LRK	14 bis 19	0,003-0,1 m

Tabelle 3.3: Korrekturmodi des GPS-Signals und die Lagegenauigkeiten beim Ashtech Aquarius-22 (angelehnt an Ashtech 2003).

Es gibt verschiedene Quellen und Typen der Korrekturdaten, die auch verschiedene Genauigkeiten der 3D-Positionsbestimmung versprechen. Die kostenlosen und unverschlüsselten Korrekturdaten für die Luftfahrt und Seefahrt (auch BEACON genannt) beinhalten die Streckenkorrekturen für die Entfernungsmessung zum Satelliten. Sie werden z.B. von der Station Helgoland auf der Frequenz 298,6 kHz gesendet und können über weite Entfernungen (z.B. in Hamburg) empfangen werden. Diese Verfahren werden mit der Sammelbezeichnung *Differential GPS* versehen, weil die wirksamen Fehler als Differenz wegfallen. Die Genauigkeit, die in diesem Verfahren erreicht wird, liegt im Meterbereich für die Lagekoordinaten (2D)

und verschlechtert sich mit der Entfernung von der Referenzstation (andere ionosphärischen Bedingungen, andere Satellitenkonstellation). In der Tabelle 3.3 sind Angaben des Herstellers Ashtech zusammengetragen. Die Genauigkeit der Höhenbestimmung ist aufgrund der geometrischen Verteilung der Satelliten über dem Rover um den Faktor 1,5 bis 2 schlechter als bei der Lagenbestimmung.

Werden Lagegenauigkeiten im dm-Bereich oder sogar besser benötigt, müssen kostenpflichtige Dienste oder eine eigene Referenzstation zum Einsatz kommen. Diese basieren auf der Lösung der Trägerphasenmehrdeutigkeit, die in Echtzeit zum Rover übertragen werden müssen. Hierzu eignen sich die UHF und VHF-Bänder als Kommunikationskanäle, die aber die Reichweiten auf wenige 10-ig Kilometer beschränken (VDV 1995). Die Erhöhung der Reichweiten kann durch die Anhebung der Sendeleitung oder durch einen höheren Antennen-aufbau erreicht werden. Aufgrund der erreichbaren Genauigkeit in der absoluten Positionierung spricht man vom *Präzisen DGPS*.

Die Genauigkeit der Positionierung hängt nicht nur von dem Typ der verwendeten Korrekturdaten und der Entfernung zur Referenzstation ab. Die Genauigkeit der Pseudorangemessungen  $\sigma_r$ , Anzahl der Satelliten und vor allem ihrer räumlichen Verteilung über dem Rover, haben Einfluss auf die absolute Genauigkeit der Positionsbestimmung. Der reziproke Wert aus dem aufgespannten Volumen zwischen den Satelliten und dem Rover ist ein Skalar und wird in der Navigation *Position Dilution of Precision* (PDOP) genannt. Für die Genauigkeit der Positionsbestimmung ergibt sich nach (VDV 1995):

$$\sigma_p = \text{PDOP} + \sigma_r \quad (3.1)$$

wobei:

- $\sigma_p$  := Genauigkeit der Positionsbestimmung
- $\sigma_r$  := Genauigkeit der Pseudostreckenmessung
- PDOP := Skalar aus Position Dilution of Precision

Es gibt weitere DOP-Werte, die in diesem Zusammenhang auftreten (Kahmen 1997):

- GDOP Geometrical DOP = 3D-Koordinaten und Zeit
- HDOP Horizontal DOP = 2D-Koordinaten
- VDOP Vertikal DOP = Höhe

Die Bestimmung der Geschwindigkeit bei GPS erfolgt entweder aus der Dopplerverschiebung oder aus der Differenzierung des Ortes nach Zeit (Böder 2002). Die Genauigkeit der Differenzierung des Ortes nach Zeit hängt von der Genauigkeit der 2D-Ortsbestimmung ab, die aus der Dopplerverschiebung ist hiervon unabhängig (Mueller & Wagner 2009). Die Genauigkeit der Geschwindigkeit aus der Dopplerverschiebung liegt bei 2 bis 5 cm/s (Email Javad). Die Auswirkung beider Methoden auf die Genauigkeit der ADCP-Messung wird im Kapitel 4 diskutiert.

### 3.3.2 Spezifikationen von Ashtech und Javad

Das Ashtech Aquarius<sup>2</sup>-22 (heute Thales) ist ein Zweifrequenzgerät mit zwei GPS-Empfängern. Die Master- und die Slaveantenne haben einen konstanten Abstand (*engl. baseline*), der für dieses Messsystem mindestens 2m betragen sollte. Die Neigung zwischen den beiden Antennen beim Aufbau sollte den Wert von  $\pm 20^\circ$  entlang der Basislinie nicht überschreiten (Ashtech 2002). Da der absolute GPS-Fehler auf beiden Antennen identisch ist, ist eine präzise Bestimmung sowohl des Schiffskurses (*engl. heading*) als auch der Lagewinkel möglich. Je nach Ausrichtung der GPS-Antennen wird entweder das Stampfen der Plattform (Ausrichtung parallel der Schiffslängsachse) oder das Rollen (Ausrichtung quer zu Schiffslängsachse) bestimmt. Unabhängig von der GPS-Antennenausrichtung, wird die momentane Ausrichtung der Schiffsachse (Heading) zum geographischen Nordpol aus der Phasenverschiebung bestimmt und ist im Vergleich zum konventionellen, mit Trägheit versehenen Kreiselkompass präziser (Ruiz 2002). Obwohl rein theoretisch nur vier Satelliten notwendig sind, um GPS-Ortung betreiben zu können, wurde beobachtet, dass bei einer Satellitenanzahl unter sechs (Elevationsmaske  $10^\circ$ ), die Berechnung von Heading, Roll oder Pitch durch häufige Aussetzer (kein Wert) negativ auffiel. Eine Erklärung hierfür seitens des Herstellers gab es nicht, die Aussetzer in der Strömungsmessung, die dadurch entstanden sind, werden im Kapitel 4 diskutiert. Die Geschwindigkeiten und der Kurs über Grund werden ebenfalls aus der Dopplerverschiebung an der Masterantenne berechnet.

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung ist bei diesem Gerät in drei Qualitätsstufen verfügbar. Im Modus ohne Korrekturinformationen (*engl. stand alone* oder nur GPS bezeichnet) werden für die Lagegenauigkeit in Abhängigkeit von der Satellitenkonstellation und der Satellitenanzahl wenige Meter angegeben, siehe Tabelle 3.3. Beim Empfang der Korrektursignale (Differenzielles GPS) für die Schifffahrt (*Beacon*) wird die Genauigkeit der Lage auf einen absoluten Fehler von einigen Dezimeter bis zu 2 m angegeben. Unter Benutzung von eigenen Referenzstationen oder Referenzdiensten werden beim optimalen Empfang der Korrektursignale in Echtzeit (*Real Time Kinematic*) Genauigkeiten erreicht, die im cm-Bereich liegen (Lage und Höhe). Die Höhenauswertung von Stand Alone und dem DGPS Modus sind für Echtzeit-Vermessungszwecke nicht verwertbar, weil der absolute Fehler (mehrere Meter) zu groß ist, siehe Kapitel 4. Da beide Korrekturdatenempfänger im Aquarius-22 fest eingebaut sind, wurden beim Empfangsabbruch der Referenzstation die Beacon-Korrekturen solange verwendet bis die eigene Referenzstation wieder empfangen wurde. Beim Umschalten entstanden daher Sprünge in der Position, die bei der Verwendung des GPS-GGA als Referenz für das ADCP Ausreißer verursachte.

Das Javad Gyro-4T GPS-Gerät ist ein ähnliches System wie das Ashtech Aquarius-22 mit dem Unterschied, dass es vier Zweifrequenz GPS-Empfänger und –Antennen hat. Roll und Pitch werden aus den Differenzen der Trägerphasen aller vier GPS-Antennen gerechnet. In der Abbildung 3.11 ist die Anordnung der Antennen auf den Schiffen schematisch dargestellt. Für die Genauigkeit der Positionsbestimmung gelten die drei Stufen der Positionsbestimmung

analog zum Ashtechempfänger. Die Verwendung der Korrekturdaten in Abhängigkeit von der Messkampagne und dem Gerät sind in der Tabelle 3.2 zusammengestellt. Die Mess- und Ausgabefrequenz dieses Gerätes beträgt bis zu 20 Hz. Die Genauigkeit der Lagewinkelbestimmung ist von der Länge der Basislinien zwischen den GPS-Antennen abhängig und lässt sich nach (Allsat 2007) wie folgt berechnen:

$$\sigma_{\text{Heading}} = \frac{0,23^\circ}{LB_1} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{\text{Roll/Pitch}} = \frac{0,46^\circ}{LB_2} \quad (3.3)$$

wobei:

- $\sigma_{\text{Heading}}$  := Genauigkeit der Kursbestimmung (RMS)
- $\sigma_{\text{Roll/Pitch}}$  := Genauigkeit der Stampf- und Rollwinkelbestimmung (RMS)
- $LB_1$  := Länge der Basislinie GPS-Masterantenne zu GPS-Slave2 in Meter
- $LB_2$  := Länge der Basislinie GPS-Slave1 zu GPS-Slave2 in Meter

Die Abbildung 3.13 stellt diesen Zusammenhang zusätzlich graphisch dar.

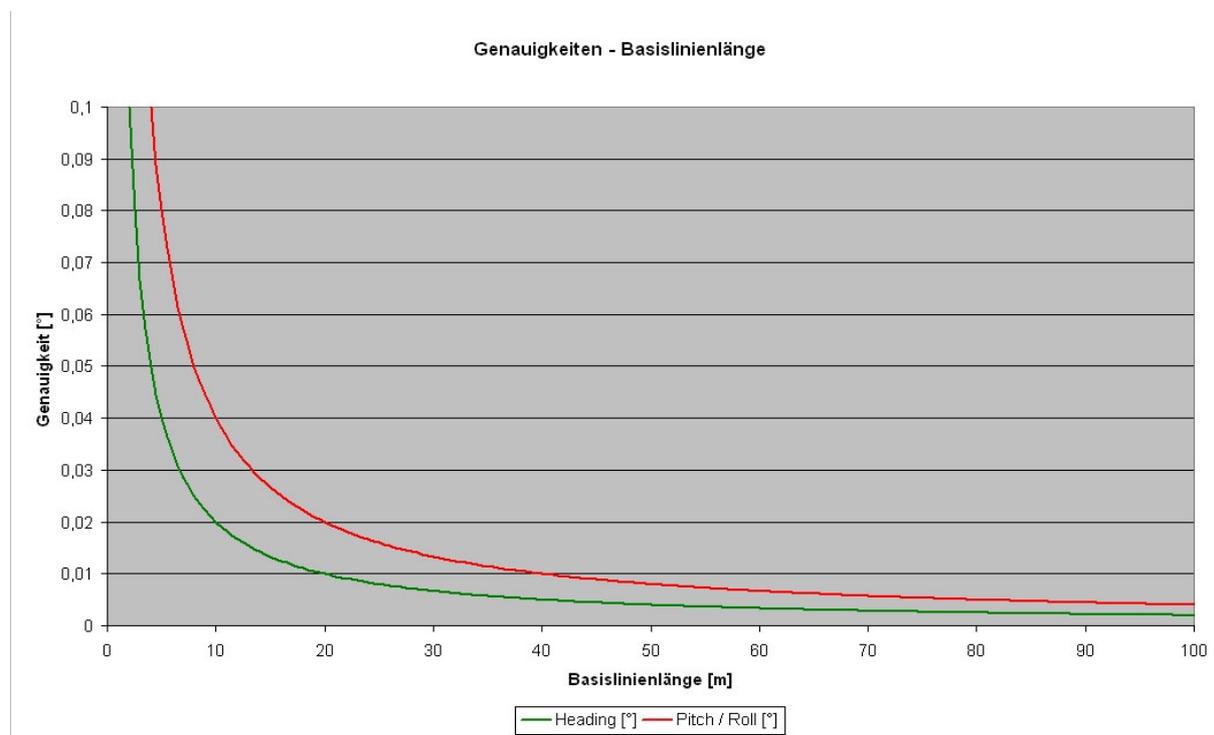


Abb. 3.13: Genauigkeiten der Lagewinkel des Bewegungssensors Javad Gyro-4T in Abhängigkeit von der Länge der Basislinien. (Allsat 2007).

### 3.3.2 GPS-Datentelegramme

Die US-amerikanische Gesellschaft *National Marine Electronics Association (NMEA)* hat mit ihrer Definition des Standards *NMEA 0183* einen Kommunikationsstandard zwischen Navigationsgeräten festgelegt, der immer noch weitverbreitet ist. Die auf den Schiffen verwendeten GPS-Geräte, Kompass, Echolote usw. sind alle in der Lage Datenstrings in dem NMEA 0183 Format auszugeben bzw. zu verarbeiten.

Im Anhang B befinden sich vollständige Beschreibungen der benutzten Datentelegramme. Hier folgt eine Kurzbeschreibung der wichtigsten Inhalte dieser Telegramme:

Das Datentelegramm *GGA* wird auch Positionsstring genannt, weil es Informationen zum exakten Zeitpunkt in UTC der 3D-Positionsbestimmung (Latitude und Longitude (DEG) mit der Hemisphäre (N-S und W-E) über *WGS84*) und der Höhe über dem WGS84 oder wahlweise ein Geoid beinhaltet. Die Qualität dieser Positionsbestimmung bestehend aus HDOP, Anzahl der benutzten GPS-Satelliten und falls benutzt, die Quelle der Korrektursignale wird genannt. Der String *VTG* beinhaltet den Schiffskurs über Grund in DEG und die horizontale Geschwindigkeit über Grund aus der Dopplerverschiebung des GPS-Signals in Knoten und in km/h. Die Information über die Ausrichtung der Schiffslängsachse zu geographischen Nord in DEG enthält der String *HDT*. Die Rotationen der Plattform wie Heading in DEG, Rollwinkel in DEG und der Stampfwinkel sowie Anzahl der benutzten Satelliten für Bestimmung der Lage dieser Winkel, sind im Datentelegramm *HRP* vereint. Die Angaben zum Zeitpunkt der Positionierung im GGA-String beschränken sich auf die Uhrzeit, während im Datentelegramm *ZDA* auch das Datum vorliegt. Bei Messungen über den Mitternachtsdurchgang hinweg konnte somit die absolute Zeitstempelung einiger Datenströme korrigiert werden, mehr dazu im Kapitel 4.

### 3.4 ADCP-Datennahme

Alle Daten, die in dieser Arbeit behandelt werden, sind mit der Software WinRiver-Acquire 1.06 des Herstellers RDI erhoben worden. Diese Software ermöglicht die Konfiguration der Messung wie Zellengröße, maximale Tiefe, Modus der Datenprozessierung, Einstellungen der Schwellenwerte für Ausreißerdetektion, Anzahl der Pulse pro Ensemble und die Ensemblegröße. Diese Software kommuniziert über eine serielle Schnittstelle mit dem ADCP-Sensor, empfängt die Kursinformationen HDT und die Telegramme GGA und VTG aus dem GPS, analysiert sie und verrechnet die Schiffsbewegung mit den relativen ADCP-Messungen zu absoluten Strömungswerten. Alle gemessenen Daten (relative und absolute) sowie die Daten externer Sensoren (Kompass, GPS oder Echolot) können alphanumerisch oder graphisch in Echtzeit visualisiert werden. Die Daten externer Sensoren werden optional in separaten Dateien gespeichert. Die ADCP-Messung mit den Informationen externer Sensoren wird kombiniert in einer gemischte ASCII-binäre Datei abgelegt. Der gesamte Datenfluss während der Datenerhebung ist in der Abbildung 3.14 schematisch dargestellt.

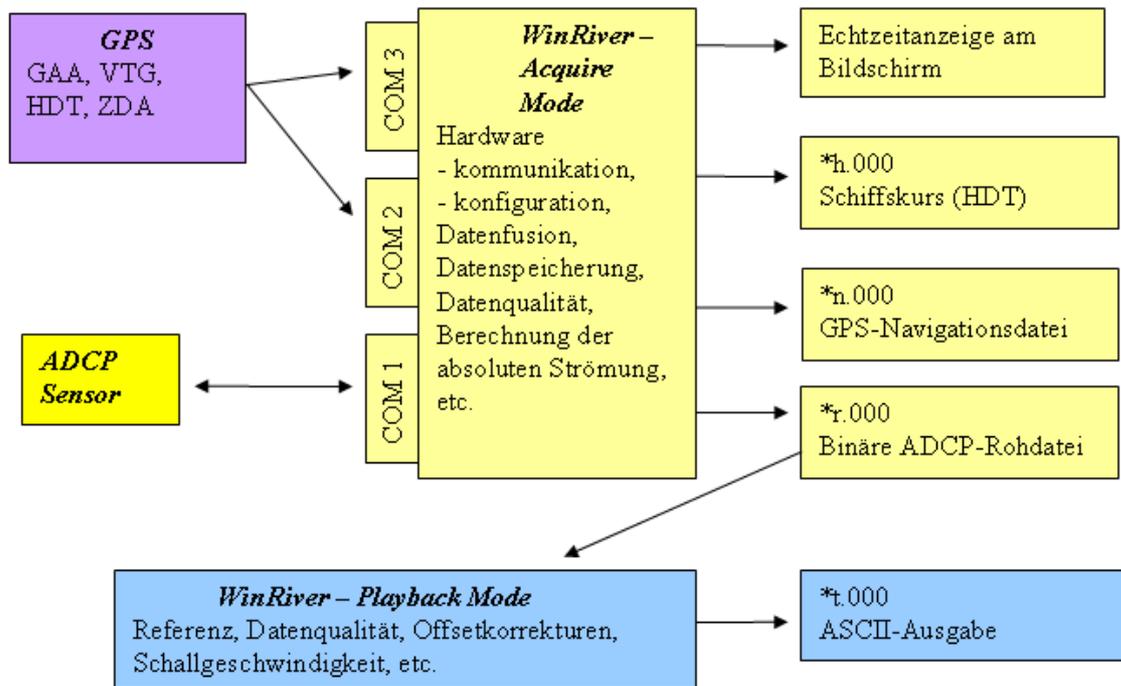


Abb. 3.14: Flussdiagramm der Datennahme mit der Software WinRiver 1.06 des Herstellers RDI

In dem Kapitel 3 wurden die Messgebiete und ihre charakteristischen Strömungsverhältnisse kurz beschrieben. Die Trägerplattformen und die verwendete Hard- und Software zur Datenerhebung wurden vorgestellt. Ein kurzer Überblick über die Funktionsweise und Genauigkeiten der GPS-Technik wurde gegeben. Einige Spezifikationen der benutzten GPS-Navigationssysteme und ihre Datenausgabeformate wurden genannt. Einige ausgesuchte Datensätze wurden präsentiert und die Problematik bei der Datenauswertung angesprochen. In den folgenden Kapiteln 4 und 5 werden die hier formulierten Fragen beantwortet.

## 4 Datenqualität und Korrekturen

In diesem Kapitel wird die gesamte ADCP-Postprozessierung vorgestellt, die zum Teil mit der Standardsoftware WinRiver-Playback realisiert wurde. Der Einfluss diverser Parametereinstellungen sowie einiger Korrekturen auf die Datenqualität im WinRiver-Playback wird diskutiert. Der Referenzenvergleich zwischen Bottom Track, GPS-GGA und GPS-VTG hilft folgende Fragen aus dem Kapitel 3 zu beantworten:

**Frage 1:** Welche Referenz Bottom Track, GPS-GGA oder GPS-VTG ist geeigneter für die ADCP-Messung in den drei Messgebieten?

**Frage 4:** Weshalb sind die ADCP-Schlauchbootmessungen mit baugleichem ADCP-Gerät in demselben Messgebiet verrauschter im Vergleich zu der Prandtlmessung?

**Frage 6:** Welchen Einfluss hat die Plattformbewegung auf die ADCP-Messung und wie ist der Zusammenhang dieser Bewegung zu der Referenz?

**Frage 7:** Besteht die Möglichkeit die Schallgeschwindigkeit abzuschätzen und wenn ja, welche Unsicherheit folgt für die Strömungsbestimmung?

Da der Funktionsumfang des Playback-Moduls eingeschränkt ist, mussten notwendige Prozessschritte (Bereinigungen, erweiterte Korrekturen, etc.) mit selbstimplementierten Skripten in der Programmiersprache PV-WAVE anschließend durchgeführt werden. Die Abbildung 4.1 stellt ein Flussdiagramm der gesamten Datenprozessierung dar.

### 4.1 WinRiver I - Playback

Das Playback-Programm bietet dem Benutzer optional unter anderem folgenden Funktionsumfang bezüglich der Korrekturmöglichkeiten:

- ADCP-Einbaufehler (Beam 3 Misalignment)
- Schallgeschwindigkeit
- Schwingereintauchtiefe
- Mittelung von Ensembles
- Auswahl der Referenz (BTM, GPS-GGA, GPS-VTG)
- Optionen zur Auswahl von Datenqualität
- Selektion der Daten z.B. über Schwellenwerte
- Einschränkung der Daten durch Vorgabe von minimaler und maximaler Tiefe

Nach Abschluss der (Re-)Konfiguration werden die Rohdatensätze am Bildschirm nachprozessiert und die angezeigten Messwerte für die Weiterverarbeitung als ASCII-Datei ausgegeben, siehe Abbildung 4.1.

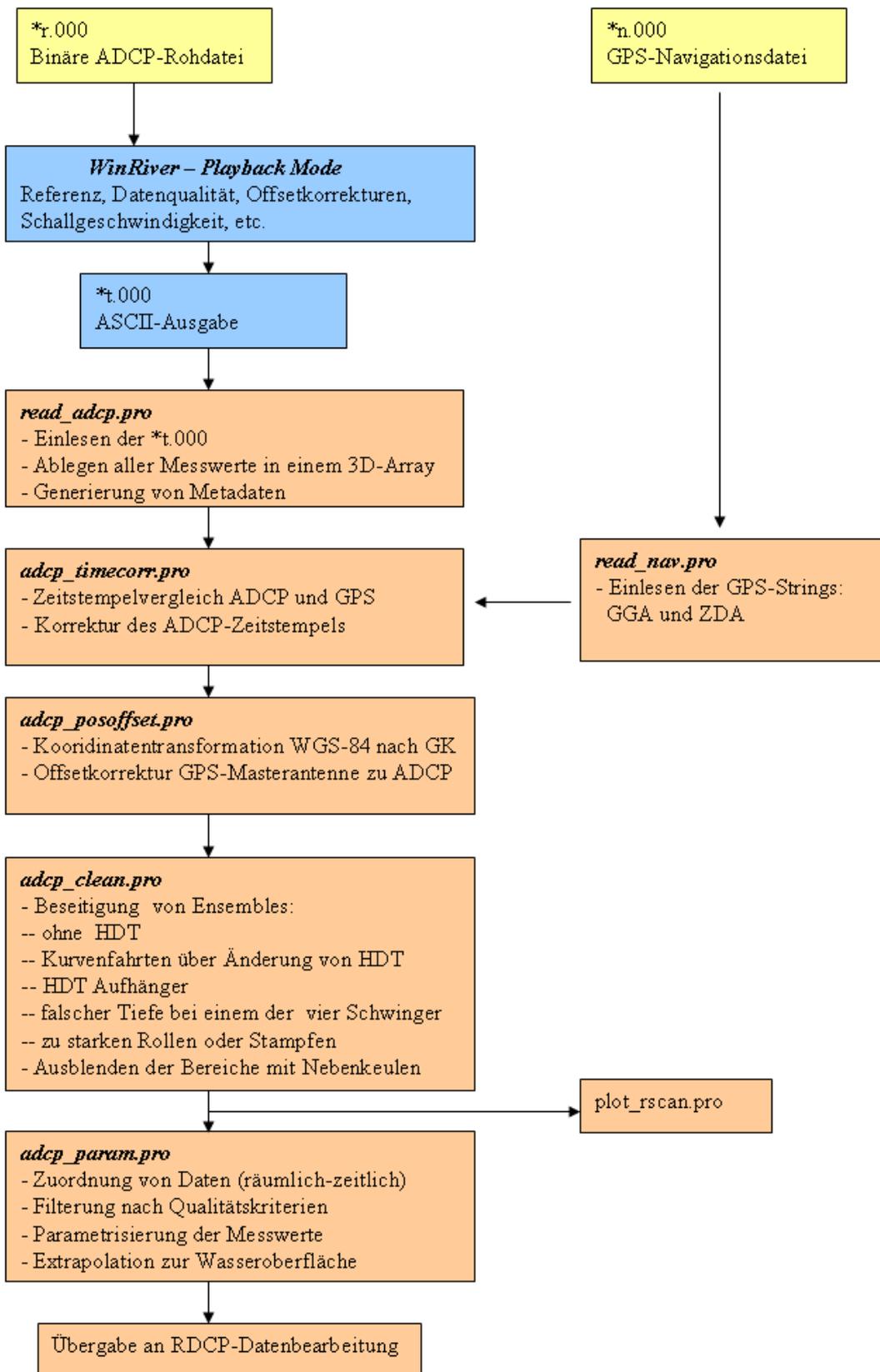


Abb. 4.1: Schematische Darstellung der ADCP-Datennachprozessierung von den Messdaten stammend aus dem WinRiver-Acquiremodul (gelber Block), über WinRiver-Playback (in blau) bis hin zu selbst-implementierter Daten-Postprozessierung mit Korrekturen, Bereinigung und Parametrisierung der Strömungsprofile in der Programmiersprache PV-WAVE (orange).

#### 4.1.1 Korrekturen des ADCP-Einbaufehlers und der Schallgeschwindigkeit

Für die Analyse der Auswirkungen eines fehlerhaften Wertes für den Salzgehalt und des Einbaufehlers in der Ausrichtung des dritten Schwingers entlang der Schiffachse wurde ein Testprofil aus dem Gebiet 1 dem Lister Tief ausgesucht, siehe Abbildung 4.2. Dieses Testprofil hat ohne Korrekturen im Salzgehalt und der Beam3-Ausrichtung die Gesamtlänge von 12606,6 m bei Refrenzierung über Bottom Track (BTM) und 12933,1 m bei GPS-GGA, d.h. es gibt eine Diskrepanz von 326,5 m.

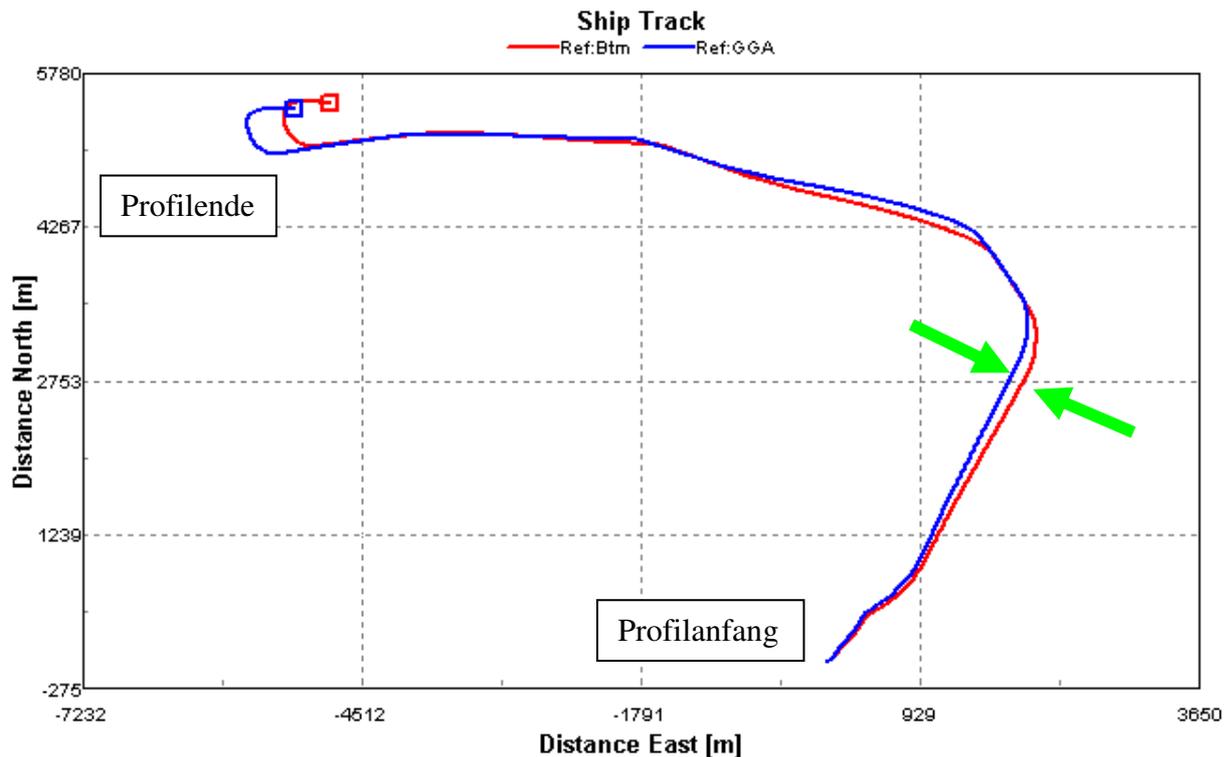


Abb. 4.2: Unterschiede in der Wegermittlung bei Benutzung des Bottom Tracks (rot) und der GPS-Position (blau) aus dem GGA-Telegramm, die durch einen Ausrichtungsfehler des dritten ADCP-Schwingers (markiert durch die grünen Pfeile) und einen fehlerhaften Wert der Schallgeschwindigkeit verursacht werden. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

Der ADCP-Einbaufehler verursacht eine Drehung und kann durch das Übereinanderlegen der Tracks von BTM und GGA empirisch ermittelt werden (Aqua Vision 2010). Hierzu ist es hinreichend einen geradlinigen Teil eines Profils mit der Länge von einigen hundert Metern zu Kalibrierungszwecken zu benutzen. Die grünen Pfeile in der Abbildung 4.2 (Entfernung von ca. 900 m vom Startpunkt) zeigen deutlich die Unterschiede in den Wegen über Grund, wenn die Referenz BTM (rot) und GGA (blau) gemeinsam dargestellt werden. Dieser Einbaufehler (Einbau für die Dauer einer ganzen Messkampagne) beträgt bei diesem Testdatensatz  $-2,2^\circ$  und ist der in der Abbildung 4.3 bereits als Verbesserung eingegeben worden. Die verbleibenden Unterschiede sind auf den fehlerhaften Wert der Schallgeschwindigkeit zurückzuführen.

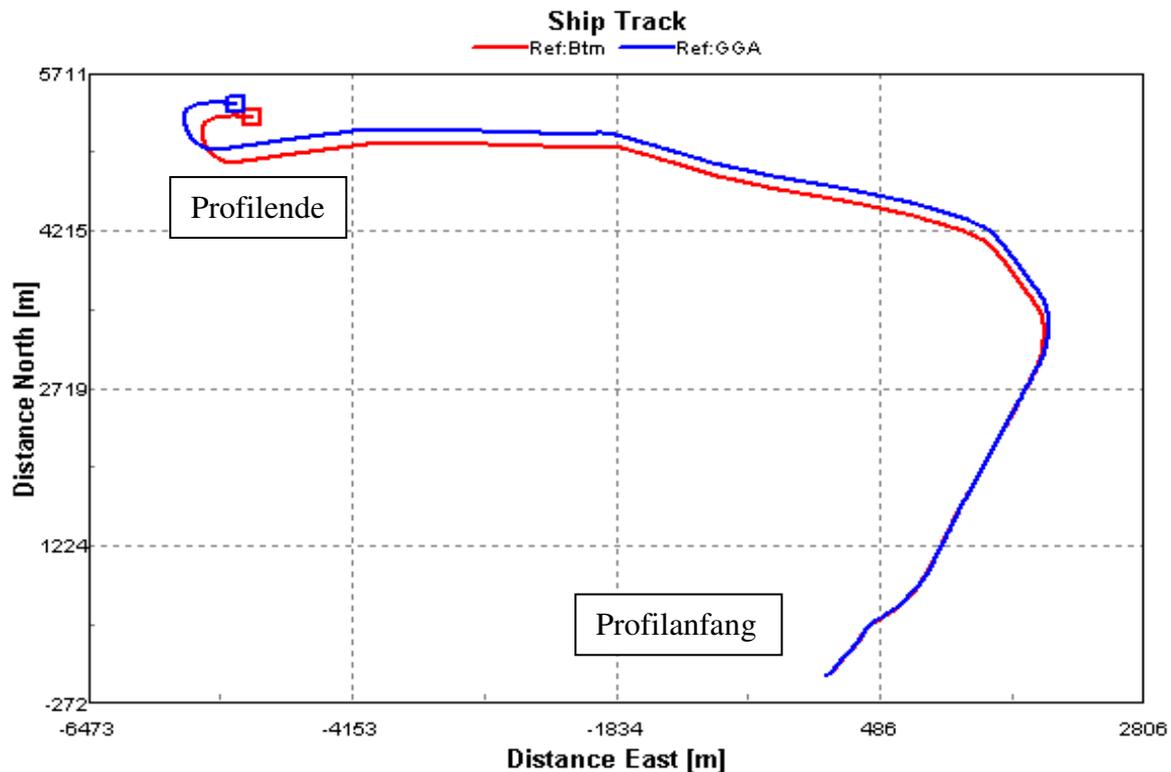


Abb. 4.3: Differenzen zwischen dem Bottom-Track (rot) und der GPS-GGA (blau), die offensichtlich aus dem fehlerhaften Wert der Schallgeschwindigkeit resultieren. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

Die Software WinRiver bietet drei Möglichkeiten um die Schallgeschwindigkeit einzugeben. Die erste Option heißt „Use ADCP Value“, die die einheitliche Schallgeschwindigkeit aus den voreingestellten Parametern Schwingereintauchtiefe, Salzgehalt (Defaultwert 0‰) und der Temperatur, gemessen durch das ADCP direkt am Schwingerkopf, berechnet. Diese Einstellung wird in der Bedienungsanleitung als „empfohlen“ hervorgehoben, wobei die Abbildung 4.3 zeigt, dass diese Option zu einer Differenz (BTM vs. GGA) führt. Die zweite Option „Calculate for each Ping“ ermöglicht die Eingabe eines festen Wertes für den Salzgehalt, die Schallgeschwindigkeit wird dann analog anhand der gemessenen Temperatur für jeden ausgesendeten Ping ausgerechnet. Dieses kann in Gezeitenflüssen zu Ungenauigkeiten führen, wenn z.B. der Profilanfang kurz vor Niedrigwasser (niedriger Salzgehalt) und das Ende des Profils bei Flut (höherer Salzgehalt) erfolgt. Die dritte Möglichkeit erlaubt die Eingabe von einer festen Schallgeschwindigkeit, die dann während der Nachprozessierung für alle Ensembles verwendet wird (RDI 2003).

Die Abbildung 4.4 zeigt, dass bei einer Eingabe des Salzgehaltes von 31 ‰ bzw. einer festen Schallgeschwindigkeit von 1495 m/s, die Endpunkte beider Tracks BTM und GPS-GGA zur Deckung gebracht werden können. Die Profillänge bei der Referenz BTM beträgt jetzt 12931,3 m. Es stellt sich die Frage, ob diese Methode der „empirischen Ermittlung“ von (wirksamer) Schallgeschwindigkeit bzw. des Salzgehaltes und des Beam 3 Einbaufehler eine geeignete Methode ist, um die Schallmessungen zu ersetzen? Wenn ja, dann ist das die Ant-

wort auf den ersten Teil der Frage 7: „besteht die Möglichkeit die Schallgeschwindigkeit abzuschätzen“? Eine geeignete Methode der Schallgeschwindigkeitsbestimmung für die Messdaten der Messkampagne Mai 2010 ist erforderlich, da die CTD-Sonde, die zur Bestimmung von Salzgehalt, Temperatur und Tiefe dient, zu diesem Zeitpunkt defekt war. In der Bedienungsanleitung der holländischen Software VISEa DAS wird sogar empfohlen, durch die Veränderungen der Schallgeschwindigkeit die Profilen von BTM und GPS-GGA zur Deckung zu bringen (Aqua Vision 2010). Ob das uneingeschränkt möglich ist, müssen zunächst die Unterschiede in den Modi Bottom Track und GPS-GGA näher betrachtet werden.

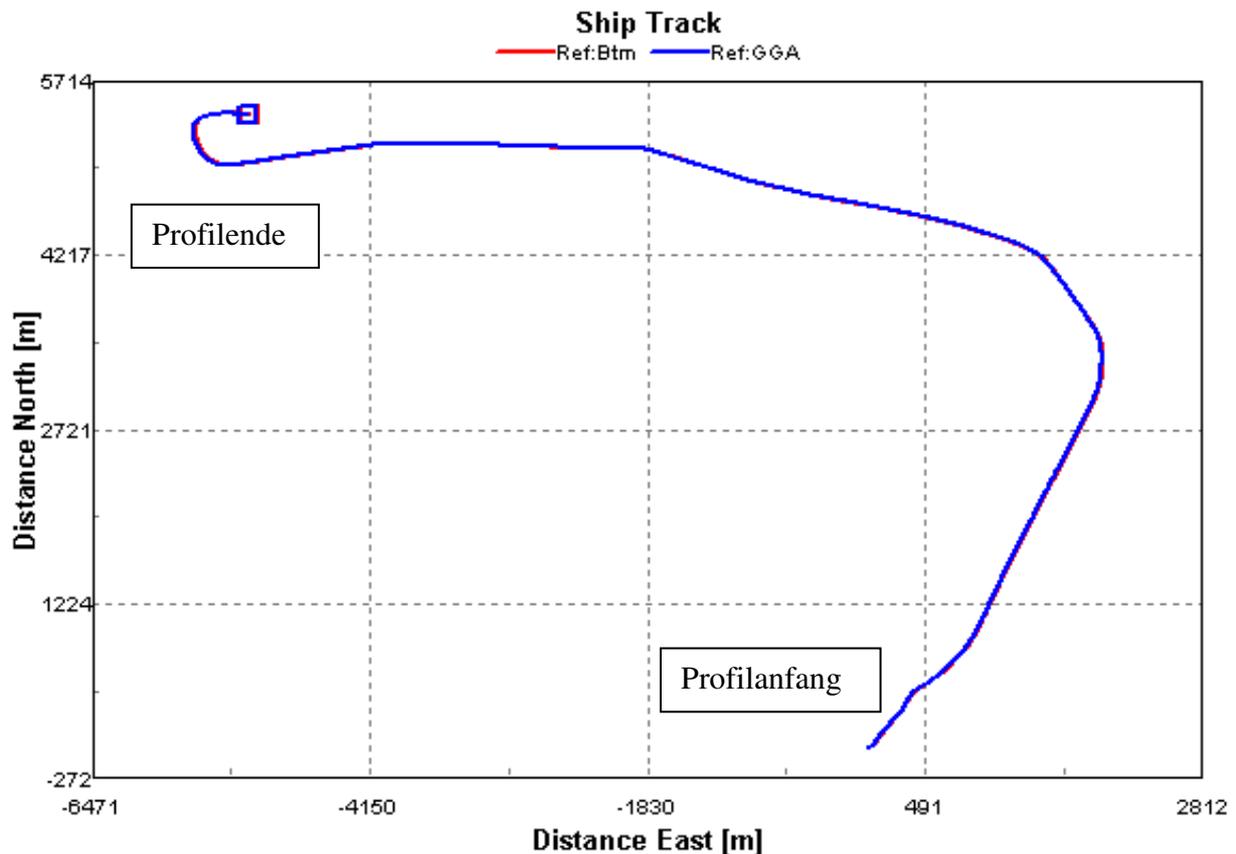


Abb. 4.4: Wege über Grund aus dem Bottom Track und der GPS-Positionsreferenz nach der empirischen Korrektur des Beam 3 Einbaufehlers und der Schallgeschwindigkeitskorrektur. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver

#### 4.1.2 Referenzen: Bottom Track, GPS-GGA und GPS-VTG

Die Empfehlung des Herstellers RDI das GPS als Referenz anstelle von Bottom Track zu benutzen, betrifft zwei Sonderfälle. Der erste Fall tritt bei Sedimentbewegung in der Nähe des Meeresbodens bzw. der Flusssohle (*Moving Bed*) ein und der zweite, wenn hohe Sedimentkonzentration in der Wassersäule das Detektieren von Meeresboden verhindert (*Water Bias*). In beiden Fällen ist die Strömungsmessung systematisch verfälscht und dadurch die Benutzung von DGPS und eines zusätzlichen Echolots empfohlen (RDI 2003).

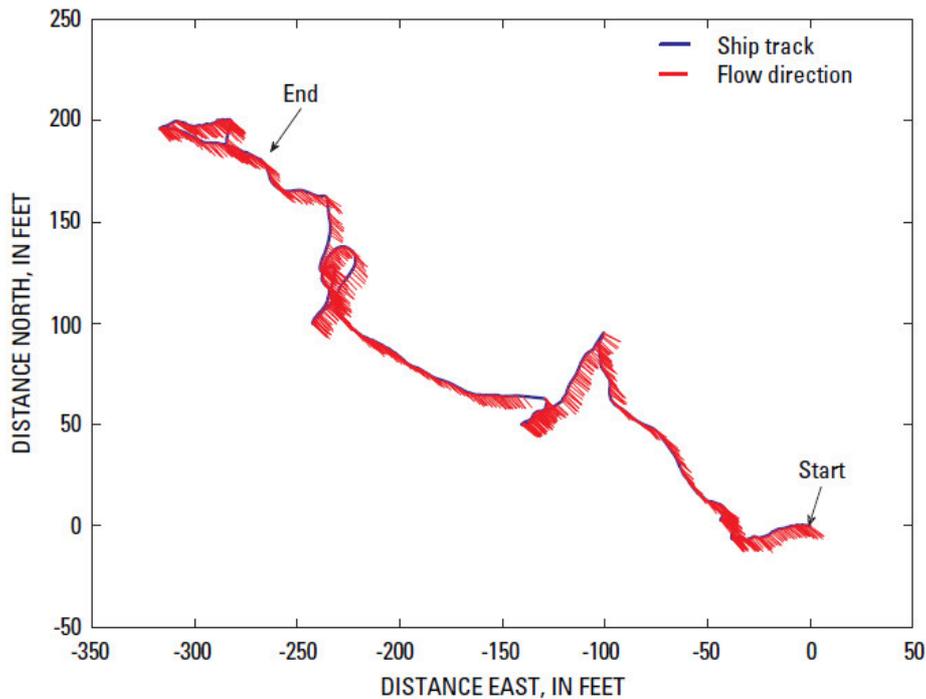


Abb. 4.5: Scheinbare Bewegung der ADCP-Plattform (flussaufwärts) während einer stationären *Moving-Bed Test*messung, die durch die Sedimentbewegung an der Gewässersohle verursacht wurde. (Mueller & Wagner 2009).

Die Vorschriften zur Qualitätssicherung der ADCP-Messungen schreiben vor, in jedem Messgebiet einen *Moving-Bed Test (MBT)* durchzuführen, bevor mit der Messung begonnen wird (Environment Canada 2004). Es gibt nach (Mueller & Wagner 2009) drei Methoden diesen Test durchzuführen. Die erste Methode behandelt den Fall der stationären Messung (z.B. durch Verankerung des Bootes) ohne GPS, vergleiche Abbildung 4.5. Hierbei wird die Bewegung über Grund aus dem BTM fünf Minuten lang beobachtet. Erscheint im Fenster „Ship Track“ eine scheinbar zurückgelegte Strecke gegen die Hauptrichtung der Strömung (upstream), so handelt es sich um den Fall der bewegten Flusssohle. Teilt man die zurückgelegte Strecke  $S_t$  durch die Messdauer  $T_t$ , erhält man die Geschwindigkeit der Sandbewegung direkt an der Gewässersohle (*moving-bed velocity*). Diese Geschwindigkeit im Verhältnis zu der mittleren Strömung im Messgebiet liefert die Informationen über die Genauigkeit der ADCP-Strömungsmessung in diesem Gebiet:

$$Q_{mbt} = \frac{V_{mb}}{V_s} \quad (4.1)$$

mit:

$$V_{mb} = \frac{S_t}{T_t} \quad (4.2)$$

wobei:

- $V_{mb}$  := Geschwindigkeit des Sediments
- $Q_{mbt}$  := Geschwindigkeitsquotient
- $S_t$  := scheinbar zurückgelegte Strecke in Metern
- $T_t$  := Dauer des Tests in Sekunden
- $V_s$  := mittlere Fließgeschwindigkeit des Wassers

Die Qualität dieses Moving-Bed Tests hängt hauptsächlich von der Stationarität des Bootes ab. Ist eine leichte Drift oder Bewegung der ADCP-Plattform während der Testdauer beobachtet worden, so sollte der Geschwindigkeitsquotient  $Q_{mbt}$  unter 0,02 liegen, falls keine bewegte Sohle vorgefunden ist. Wenn die Plattform während der Testmessung absolut stationär war, sollte dieser Quotient nicht mehr als 0,01 überschreiten (Mueller & Wagner 2009).

Die zweite Methode, die von Autoren als genauer bewertet wird, basiert auf einer stationären Messung unter Verwendung von GPS. Der Ablauf ist identisch wie bei der ersten Methode, nur dass die „scheinbare“ zurückgelegte Strecke aus dem BTM um die tatsächlich zurückgelegte Strecke (falls sich die Plattform während der Testdauer bewegt hat) aus dem GPS-Track korrigiert wird. Auch hier gilt der Moving Bed Test als positiv bestanden, wenn 1% der Geschwindigkeitsunterschiede zwischen BTM und GPS-GGA auftreten (Mueller & Wagner 2009).

Die beiden stationären Testmethoden (mit und ohne GPS) werden nur an einer Stelle durchgeführt und deswegen sind die Ergebnisse des MBT nicht immer repräsentativ für das gesamte Messgebiet. Daher wird eine dritte Methode empfohlen, die auf dem Durchfahren einer Schleife basiert und aufgrund des Verlaufes *Loop Method* heißt. Das Schiff startet an einem festen Punkt z.B. einer Boje am Uferrand, überquert den Fluss, kehrt um und erreicht exakt den festen Startpunkt, vergleiche Abbildung 4.6. Wenn sich das Sediment der Flusssohle in Bewegung befindet, erscheint im Fenster „Ship Track“ ein räumlicher Versatz zwischen dem Start- und dem Endpunkt der Schleife, der Endpunkt ist scheinbar oberhalb des Startpunktes. Die Entfernung zwischen den beiden Punkten  $D_{up}$  dividiert durch die Messzeit der Schleife, ergibt die durchschnittliche Geschwindigkeit der Sedimentbewegung des Flussbettes. Bei dieser dritten Methode ist es essentiell, den internen Kompass vorher kalibriert zu haben. Die Kriterien für die Aussage darüber ob eine bewegte Sohle vorgefunden worden ist oder nicht, sind identisch zu denen der stationären Messmethoden.

Fällt das Ergebnis des Moving-Bed Tests positiv aus, wird empfohlen alle Messungen per GPS zu referenzieren. Die Geschwindigkeit und der Kurs, berechnet aus den Wegepunkten des GPS-GGA Telegramms, ist in der Regel frei von systematischen Fehlern (im Vergleich zu BTM), aber nicht frei von Aussetzern, die z.B. bei GPS-Sprüngen eine fehlerhafte Geschwindigkeit liefern. Diese Sprünge resultieren häufig aus dem Verlust oder der Wiederaufnahme des Empfanges von GPS-Korrekturdaten und dem damit verbundenen Qualitätswechsel, die im „Ship Track“ als Sprünge im Track zu sehen sind und im ADCP-Strömungsprofil als horizontale Beschleunigung in der Wassersäule.

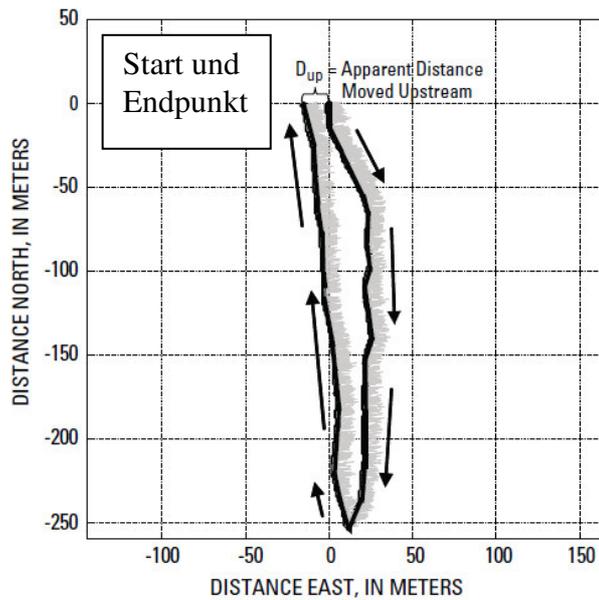


Abb. 4.6: Scheinbarer räumlicher Versatz am Ende der *Moving-Bed Testmessung* bei der Schleifenmethode, die durch die Sedimentbewegung an der Gewässersohle verursacht wurde. (Mueller & Wagner 2009)

Die Qualität der GPS-Daten hängt davon ab wie viele Satelliten und in welcher Konstellation (=räumliche Verteilung) zur Verfügung stehen sowie aus welcher Quelle die GPS-Korrekturdaten stammen, falls sie überhaupt empfangen und verwendet wurden. Im Abschnitt 3.3 sind die verschiedenen Möglichkeiten die GPS-Messung in Echtzeit zu korrigieren erwähnt worden und die Details zu den Datentelegrammen zusammengestellt, auf die hier Bezug genommen wird. In den ADCP-Benutzervorschriften (Environment Canada 2004) wird empfohlen GPS-GGA als Referenz zu nehmen, wenn der HDOP-Wert (Horizontal Dilution of Precision) unter 4 bleibt und die Differenzen in der Höhe den Wert von 3,5 m während eines Profils nicht übersteigen. U.S. Geological Survey verschärft in (Mueller & Wagner 2009, pp 49) dieses Kriterium auf HDOP unter 2, Sattelitenwechsel während des Profils nicht mehr als eins und die Verwendung ausschließlich von DGPS-Empfängern. In derselben Publikation wird aber schließlich doch die Referenzierung über die Geschwindigkeit favorisiert, die durch die momentane GPS-Signalfrequenzverschiebung ermittelt wird und im GPS-VTG-Telegramm als Speed over Ground enthalten ist. Der Vorteil hierbei ist, dass diese Geschwindigkeit von der Mehrdeutigkeit in der Bestimmung des Phasenwinkels des GPS-Signals nicht beeinflusst wird. Diese Lösung ist aufgrund von kurzen Abtastraten unempfindlich gegenüber häufigem Satellitenwechsel oder der Mehrwegeausbreitung des GPS-Signals. Diese Lösung ist stabil und unabhängig von den GPS-Referenzdiensten und wird in einer gemeinsamen Untersuchung von Environment Canada und U.S. Geological Survey auf ihre Grenzen weiterhin geprüft (Mueller & Wagner 2009, pp49). Die Durchsicht der eigenen Messdaten, die bei der stürmischen Nordsee im September 2009 erhoben wurden, beweisen, dass die Referenzierung über GPS-VTG nicht immer die bessere Lösung darstellt, denn offensichtlich wirken sich die Plattformbewegungen im Wellengang negativ auf die Geschwindigkeitsbestimmung aus, mehr hierzu im nachfolgenden Abschnitt.

## 4.2 Referenzenvergleich

Die verschiedenen Empfehlungen aus der Literatur sowie die eigenen Beobachtungen, die bei der Durchsicht der Daten gemacht wurden, veranlassten zu einer eigenen Reihe an Untersuchungen, die helfen sollten, folgende Frage zu beantworten: Welche Referenz Bottom Track, GPS-GGA oder GPS-VTG ist geeigneter für die ADCP-Messung in den drei Messgebieten? Hierzu wurde der Einfluss verschiedener Einstellungen im WinRiver-Playback auf die Messdaten analysiert und ein Referenzenvergleich mit dem Ziel den Einfluss auf die Strömungs- und Tiefenbestimmung sowie die Plattformbewegung zu bestimmen.

### 4.2.1 Strömungsmessung

In diesem Zusammenhang wurde das Profil mit der Nummer 010 vom 12.05.2006 aus dem Messgebiet 1 (Lister Tief) exemplarisch ausgesucht und mit verschiedenen Einstellungen nachprozessiert, um die Auswirkungen von sowohl den drei Referenzen (BTM, GPS-GGA und GPS-VTG) als auch den drei Einstellungen für die Schallgeschwindigkeiten auf ein typisches ADCP-Profil zu untersuchen, siehe Abbildung 4.7. Dieses Profil wurde ausgesucht, da folgende Kriterien erfüllt sind:

- charakteristische Strömungsverhältnisse dieses Messgebietes (Konvergenzen und Divergenzen) sind in den Daten vorhanden
- kein Einfluss von Wellen in diesem Teil des Messgebietes (Windstärke unter 4 m/s aus westlicher Richtung, d.h. seegangsgeschütztes Gebiet durch die Insel)
- kaum Plattformbewegung festgestellt wurden (siehe Anhang D.1 )
- Empfang der GPS-Referenzstation ohne Unterbrechungen (siehe Anhang D.1 )

In der Abbildung 4.8 treten Bereiche von Beschleunigung und Verlangsamung der Strömung zwischen den vertikalen Strichen A und B, C und D auf. Ein Bereich, in dem Turbulenzen auftreten, liegt zwischen den Strichen C und D. Am Ende dieses Profils wurde ein vertikales CTD-Profil gemessen um den Salzgehalt, die Wassertemperatur und die Schallgeschwindigkeit zu bestimmen, siehe Anhang F1. Diese Messung ergab folgende Werte:

Tiefe Meter	Salzgehalt ‰	Temperatur °C
0,6	29	14,9
1,7	29	14,8
17,5	29	14,3

Tabelle 4.1: Ergebnisse einer vertikalen CTD-Messung im Lister Tief

Anhand dieser CTD-Messung wird nachgewiesen, dass vernachlässigbare Schichtung im Messgebiet vorlag. Die Wassertemperatur am Ende des Profils (Ort der CTD-Messung) gemessen mit dem ADCP beträgt 14,2 °C und genügt somit den U.S. amerikanischen Empfehlungen für die maximale Temperaturabweichung zwischen CTD und ADCP von drei Grad (Mueller & Wagner 2009).

Im Anhang E befindet sich eine Tabelle, die nach der Formel 2.9 die Schallgeschwindigkeiten für die Wassertemperaturen von 4 bis 21 °C und dem Salzgehalt von 0 bis 35 ‰ in Einzelschritten angibt. Der Einfluss des Druckes (=Tiefe) auf die Schallgeschwindigkeit ist vernachlässigbar klein, da die Zunahme der Schallgeschwindigkeit z.B. für 30 m Wassertiefe lediglich 0,5 m/s beträgt. Die Änderung der Temperatur um 1°C bei z.B. 29 ‰ bewirkt eine Änderung der Schallgeschwindigkeit um 3,4 m/s, die Änderung in dem Salzgehalt von 29 ‰ auf 30 ‰ bei der Wassertemperatur von 14 °C ergibt eine Korrektur von +1,2 m/s, d.h. die Wassertemperatur hat den größten Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit und deswegen ist es notwendig, dass die Temperaturmessung am ADCP-Schwingerkopf korrekt ist.

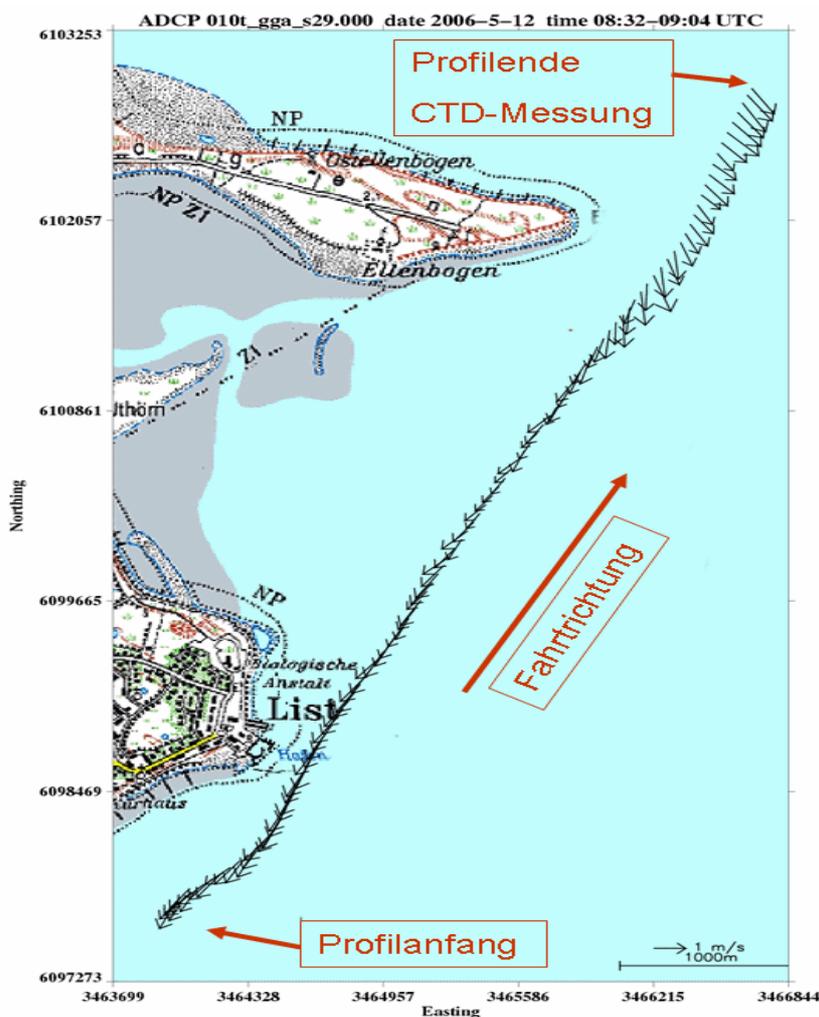


Abb. 4.7: Lage des Vergleichsprofils 010 vom 12.05.2006 mit Strömungsvektoren aus dem Tiefenlayer 2,3 m. Dargestellt wurde jedes dritte Ensemble. Hintergrundkarte aus TOP50 Schleswig Holstein-Hamburg.

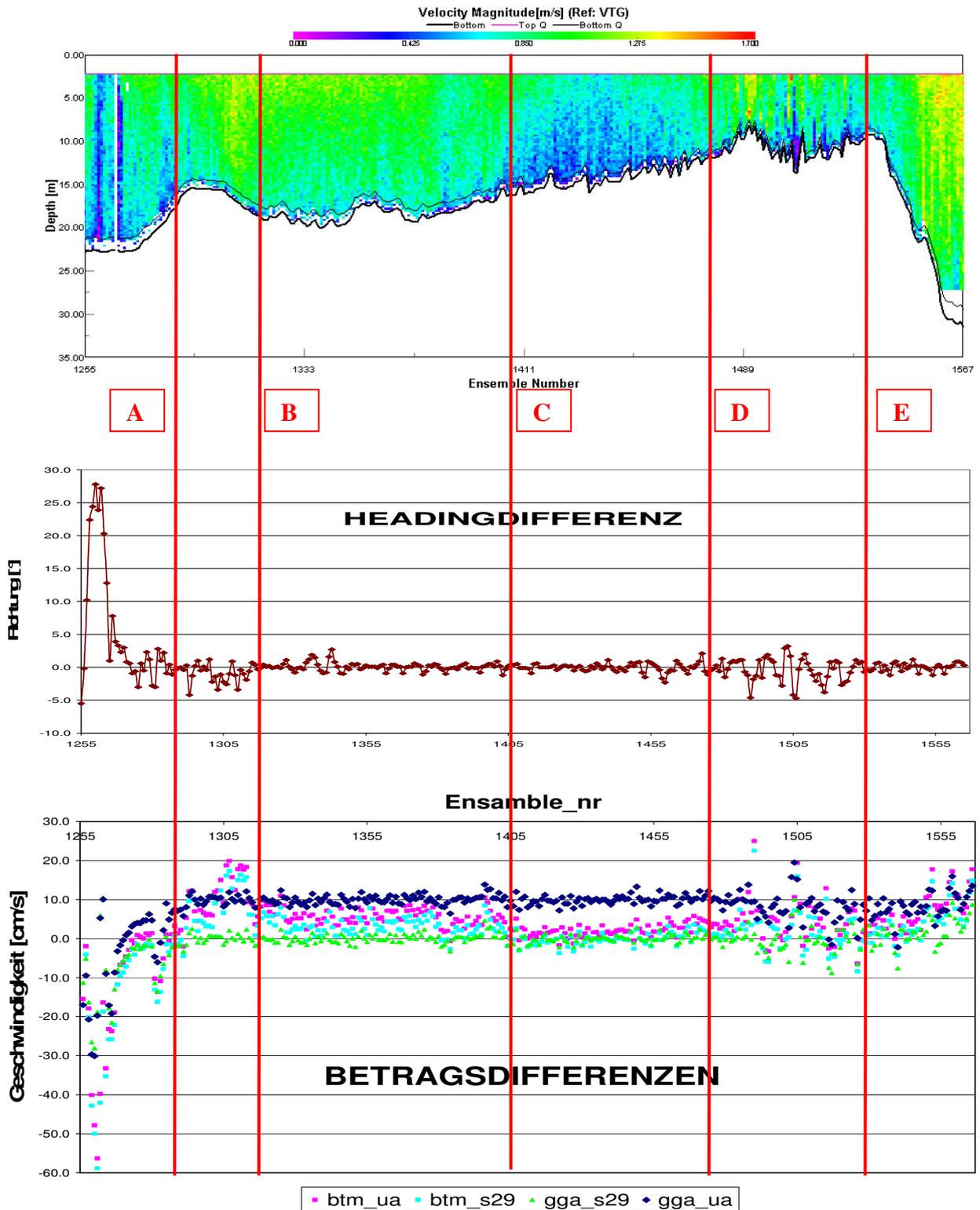


Abb. 4.8: Einfluss verschiedener Einstellungen auf die Messwerte des Profils 010 vom 12.05.2006  
 (oben): Betrag der horizontalen Strömung als vertikaler Schnitt durch die Wassersäule  
 (mitte): Differenz des Schiffskurses von Ensemble zu Ensemble  
 (unten): Betragsdifferenzen als Auswirkung verschiedener Salzgehalte und Referenzen auf den Betrag der Strömung in der Tiefe 2,3 m aus dem Profil 010 vom 12.05.2006. Salzgehalte 0‰ („ua“) und 29‰ („s29“) in Kombination mit den Referenzen BTM, GPS-VTG und GPS-GGA. Als Minuend diente GPS-VTG mit Salzgehalt von 29‰, von dem alle anderen Kombinationen subtrahiert wurden.

In der Abbildung 4.8 (unten) sind die Auswirkungen der Schallgeschwindigkeit und der Referenzen auf den horizontalen Betrag der Strömung aus dem Layer in der Tiefe von 2,3 m kombiniert abgebildet. Mit dem Kürzel „*ua*“ wird die Einstellung für die Schallgeschwindigkeit „*Use ADCP Value*“ bezeichnet, die mit dem standardmäßig voreingestellten Salzgehalt von 0 ‰ prozessiert wurde und mit „*s29*“ den tatsächlich mit CTD gemessenen Salzgehalt von 29 ‰. Als Referenz dienen die Beträge aus GPS-VTG mit „*s29*“, die von allen anderen Kombinationen (BTM und GPS-GGA) subtrahiert wurden. Die Entscheidung GPS-VTG als Master-Referenz zu benutzen, wurde aufgrund der Empfehlungen in (Mueller & Wagner 2009) sowie der eigenen Beobachtungen, die die Messungen im seegangsgeschützten Bereich, bezüglich der Hydrodynamik (Kontinuitätsgleichung Kapitel 3) plausibler erscheinen lassen, getroffen.

Vergleicht man alle Differenzen der Beträge pro Ensemble unabhängig von der Referenz in der Abbildung 4.8 (unten), so fällt am Anfang des Profils eine starke Überschätzung der Strömungsgeschwindigkeiten beim GGA (bis zu 0,3 m/s) und noch stärker beim BTM (bis zu 0,6 m/s) auf. Dies liegt daran, dass zu Beginn des Profils das Schiff gewendet hat und damit die Rotation um mehr als 10° innerhalb der Ensemblezeit von ca. 6 Sekunden die Strömungsmessung grob verfälschte. Die braune Linie in der Abbildung 4.8 (Mitte) zeigt die Differenzen im Heading von zwei aufeinanderfolgenden Ensembles. Die Beschleunigungsphase von 0 auf 3 m/s liegt ebenfalls in diesem Bereich (links vor dem roten vertikalen Strich A), der aus der weiteren Betrachtung ausgenommen wird. Nach dem Beenden des Wendemanövers steigt der Meeresboden leicht an (Abbildung 4.8 unten), sodass ein Nachteil des BTM beim *btm\_s29* und noch deutlicher beim *btm\_ua* zum Tragen kommt. Die Beträge der Strömungsgeschwindigkeit hinter der Düne werden unterschätzt, vergleiche den Bereich zwischen den vertikalen Strichen A und B. Dies folgt daraus, dass die vier ADCP-Schwinger in verschiedene Richtungen ausgerichtet sind und somit vier verschiedene Tiefen erfassen. Je nach Ausrichtung und Steigung der Sanddünen bzw. der Böschungskante relativ zu den Schwingern, scheint die Methode des Bottom Trackings als Referenz nicht geeignet zu sein, da die Genauigkeit der Strömungsmessung von der Form der Bathymetrie abhängt. In der Bedienungsanleitung von WinRiver wird an keiner Stelle die Hangneigungskorrektur erwähnt, deswegen wird hier angenommen, dass auch keine berechnet wird. In der Abbildung 4.9 sind die Tiefendifferenzen zwischen der mittleren Tiefe und den Einzellootungen der vier ADCP-Schwinger für dieses Profil separat dargestellt und werden im nachfolgenden Abschnitt detaillierter diskutiert. Die Abweichungen in der Strömungsgeschwindigkeit zwischen GPS-VTG und GPS-GAA mit dem korrekten Salzgehalt von 29 ‰ (*gga\_s29* grüne Punkte) sind dagegen in diesem Bereich unkritisch, weil unterhalb von ±10 cm/s. Im letzten Drittel des Profils 010 befinden sich mehrere kleine aber steile Erhebungen, die mit vertikalen Strichen D und E eingeschlossen sind. Auch hier weichen die Messwerte nur aufgrund der Referenz BTM oder VTG und unabhängig vom Salzgehalt (0 ‰ oder 29 ‰) bis zu 0,25 m/s von einander ab. Beachtet man die Tatsache, dass in diesem Bereich Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0,7 m/s und 1,3 m/s erreicht werden, entspricht diese Diskrepanz ca. 20 % bis 30 %.

Die horizontalen Beträge referenziert über GPS-GGA mit dem Salzgehalt von 0‰ (gga\_ua) zeigen eine systematische Unterschätzung der Strömungsgeschwindigkeit im Schnitt von 0,1 m/s unabhängig von der Strömungsstärke. Verringert sich sowohl der Betrag der mittleren Strömung auf ca. 0,7 m/s und die Gradienten in der Bathymetrie (vergleiche Abbildungen 4.8 oben und 4.9), so ist die Abweichung in den Beträgen der Strömung zwischen BTM, GPS-GGA und GPS-VTG unter  $\pm 0,05$  m/s, vergleiche Messung beim vertikalen Strich C in der Abbildung 4.8.

#### 4.2.2 Tiefenbestimmung

Die Wahl der Referenz hat keinen Einfluss auf die Tiefenbestimmung mit dem ADCP sondern ausschließlich die Schallgeschwindigkeit, die primär von der Temperatur und dem Salzgehalt abhängt. Wird im WinRiver die Option „Use ADCP Value“ mit dem Standardwert von 0‰ gewählt, so würde die Zuordnung der Tiefenzellen und die Angabe der gemessenen mittleren Tiefen z.B. bei dem bereits oben erwähnten Profil 010 in Abhängigkeit von der Tiefe 0,15 m bei ca. 8 m Wassertiefe und zu 0,7 m bei 33 m Wassertiefe zu niedrig bestimmt werden. Bei tieferen Gewässern als die im Lister Tief wächst der Fehler entsprechend.

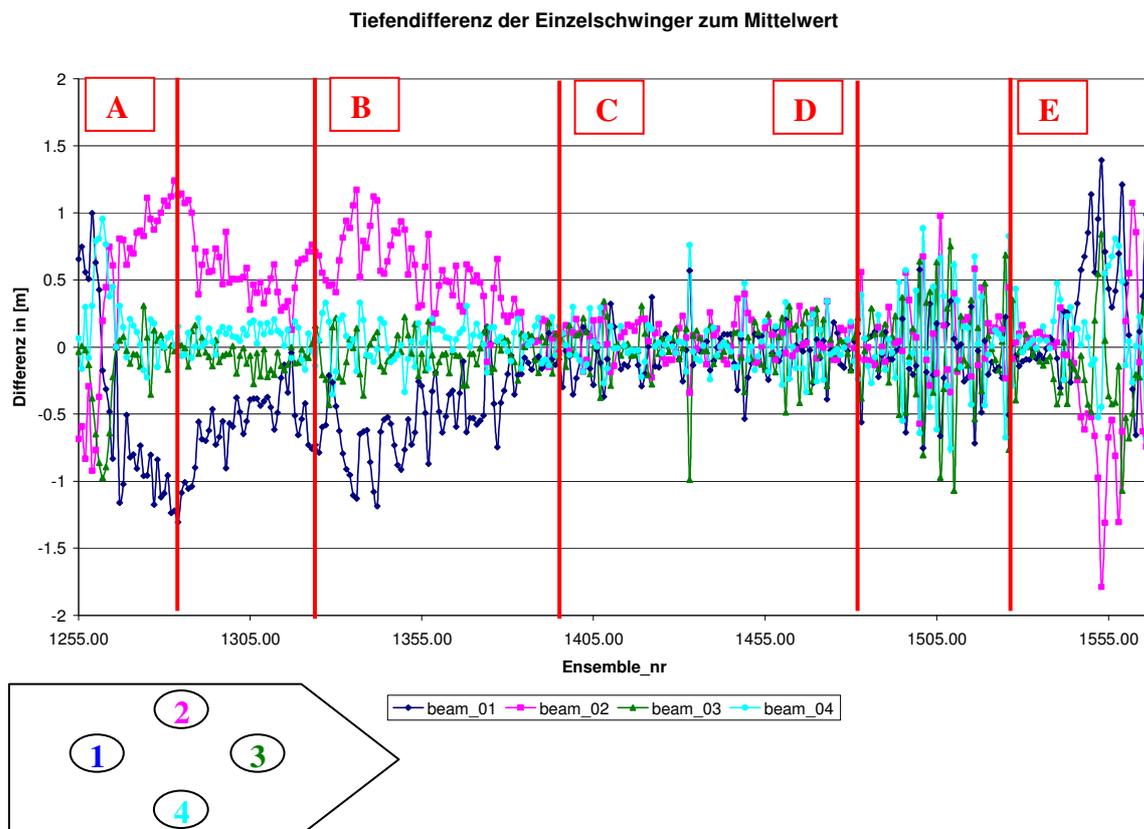


Abb. 4.9: Tiefendifferenzen der vier ADCP-Schwinger zum Mittelwert während des Profils 010 vom 12.05.2006. Als Referenz diente GPS-VTG mit Salzgehalt von 29‰.

In der Abbildung 4.9 sind die Differenzen aus der Tiefenmessung einzelner ADCP-Schwinger zum ADCP-Mittelwert (siehe Abbildung 4.8 oben) aus dem Profil 010 unter Verwendung der Schallgeschwindigkeitskorrektur für den Salzgehalt 29 ‰. Es fällt auf, dass durch die Sanddüne zu Beginn des Profils (eingeschlossen durch die Vertikalstriche A und B) die Differenzen der Tiefenmessungen aus den Schwingern 1 und 2 um über einen Meter mit verschiedenen Vorzeichen vom Mittelwert abweichen. Dies ist auf die Ausrichtung der Sandbank und/oder der Böschungskante der Fahrrinne zurückzuführen, die aus verschiedenen Richtungen von den Schwingern erfasst wurde. Dieses führte offensichtlich zu einer abweichenden Geschwindigkeitsbestimmung des Schiffes über dem Meeresboden bei Verwendung der Referenz Bottom Track. Diese bewirkte an dieser Stelle eine abweichende horizontale Strömungsgeschwindigkeit im Vergleich zu GPS-VTG. Die ausgegebenen Tiefen für die Folge an Sandrippeln und eine zweite Sanddüne, rechts zwischen den vertikalen Strichen B und C in der Abbildung 4.8 (oben), sind ebenfalls das Ergebnis der Tiefenmittelung durch das ADCP. Betrachtet man an dieser Stelle die Differenzen der Einzelmessungen der ADCP-Schwinger 1 und 2 in der Abbildung 4.9, so stellt man fest, dass diese Abweichungen ebenfalls die Größenordnungen von über  $\pm 1$  m betragen. Die Streuung der Schwinger an dieser Stelle aber ist größer als bei der ersten Sanddüne zwischen den Strichen A und B, was auf die tatsächliche Existenz von Sandrippen hinweist, die zum Teil an der Böschungskante (vergleiche Schwinger 2) und auf ansteigendem Meeresboden (negative Differenz zum Mittelwert) schräg im Raum liegen.

Der Abschnitt des Profils zwischen den vertikalen Strichen D und E weist eine starke Streuung um den Mittelwert auf und ein Vorzeichenwechsel der Differenzen. Diese aufeinanderfolgenden steilen und kurzen Sandbänke sowie die verschiedenen Blickrichtungen der ADCP-Schwinger im Raum, führen zu einem stark generalisierten Profil durch die Bathymetrie, daher auch die Abweichung in der Geschwindigkeitsbestimmung zwischen BTM und GPS-GGA bzw. BTM und GPS-VTG, vergleiche Abschnitt 4.2.1. Am Ende des Profils befindet sich ein Hang (Tiefenunterschied von 23,6 m auf einer Entfernung von 475 m), bei dem die Tiefendifferenzen aus den Einzelmessungen bis zu 1,5 m zum Mittelwert betragen. Die so berechnete mittlere Tiefe aus dem ADCP ohne ein internes Vertikallot, ist für die benötigten Genauigkeiten der Tiefenangabe in der Hydrographie nicht ausreichend. Im Bereich der Hafenzufahrt wird nach den Vorschriften der International Hydrographic Organization eine Standardabweichung von kleiner als  $\pm 0,3$  m vorausgesetzt (IHO 2005).

In (Prinz 2003, pp58) wird gezeigt, wie die mittlere ADCP-Tiefe die Strukturen der Sanddünen im Messgebiet Lister Tief stark generalisiert und an vielen Stellen im Vergleich zum Vermessungsecholot (Vertikallot 210 kHz) die Tiefen unterschätzt, siehe Abbildung 4.10. Dies ist auch der Grund warum z.B. die ADCP Modelle S5 und S9 von SonTek ein Vertikallot in der Mitte des ADCP-Kopfes besitzen (SonTek 2010). Somit wird die Zuverlässigkeit der Strömungsmessung über BTM und die anschließende Durchflussberechnung gesteigert.

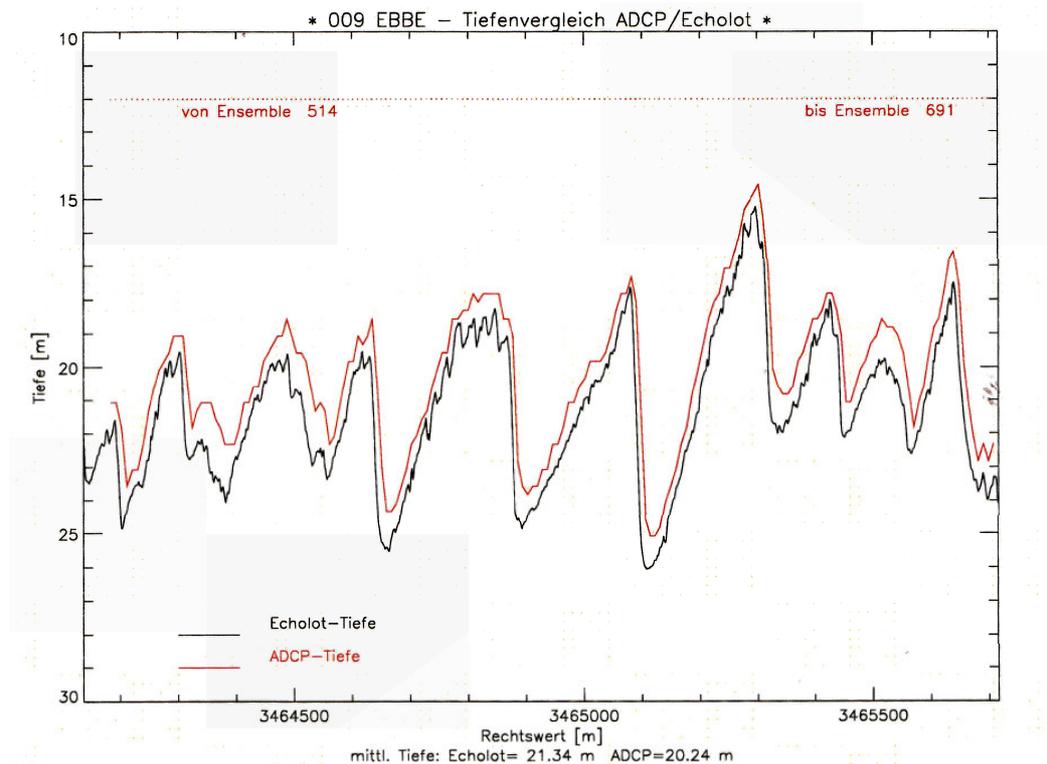


Abb. 4.10: Vergleich der Detailauflösungen und der Tiefenunterschiede zwischen einem Vermessungsecholot (schwarze Linie) und der mittleren Tiefe aus dem ADCP (rote Linie). (Prinz 2003)

### 4.2.3 Plattformbewegung

Das Rollen und das Stampfen des Schiffes werden von dem internen ADCP Neigungssensor erfasst und korrigiert (RDI 2003, Seite 107). Mehrere Datensätze erhoben im Messgebiet 1 (Lister Tief vor Sylt) mit dem leichten Schlauchboot und der L.Prandtl zeigen, dass die Roll- und Stampfkorrektur von RDI offenbar nicht optimal ausgeführt werden, siehe hierzu das Schaluchbootbeispiel im Kapitel 3.1. In WinRiver besteht die Möglichkeit die Roll- und Stampfwinkel online anzeigen zu lassen. Die Update-Rate des Fensters ist synchronisiert mit der Ensembledauer und erscheint als Mittelwert über diese Zeit. Diese Mittelwerte erscheinen auch im Header der Ensembles in der WinRiver ASCII-Ausgabe. Die Vermutung, dass das ADCP die mehrfachen Ping's pro Sekunde und über die Ensembledauer (zwischen drei und neun Sekunden) nur einmalig mit den Mittelwerten fürs Rollen und Stampfen korrigiert, wurde während der Konferenz „ADCP's in Action“ (AiA 2009) in einem persönlichen Gespräch mit einem RDI Serviceingenieur bestätigt. Seine Empfehlung lautete über mehrere Ensembles zu mitteln, sodass der Einfluss von Roll- und Stampfbewegungen der Plattform die Messwerte nicht mehr sichtbar beeinträchtigt. Diese Antwort ist unzufriedenstellend in Anbetracht der kleinskaligen hydrodynamischen Prozesse, die in den Messgebieten Lister Tief und in der Elbmündung vermessen werden sollen.

Die maximale hydrodynamische Wechselwirkung der Gezeitenströmung mit den Sanddünen findet während Ebbe direkt in dem Tidekanal „Lister Tief“ statt, siehe Details im Abschnitt 3.1.1. Die steilen Sanddünen verengen den Querschnitt des Tidekanals, so dass eine horizontale Beschleunigung und eine Änderung der Richtung in der Vertikalen (nach oben vor der Düne und nach unten dahinter) entstehen, vergleiche auch Abbildung 4.11. Diese Wechselwirkung reicht bis zur Wasseroberfläche und verursacht unterschiedliche Rauigkeit an der Wasseroberfläche (Prinz 2003) und (Hennings 2006). Betrachtet man die vertikale Komponente der Strömung im Profil 178 vom 23.05.2007, so stellt man bezüglich der Kontinuitätsgleichung starke Unterschiede in den Messergebnissen zwischen BTM und GPS-VTG fest, siehe Abbildung 4.11. Die geografische Lage dieses Profils wurde bereits in der Abbildung 3.3b im Abschnitt 3.1.1 gezeigt, alle weiteren Plots im Anhang D3.

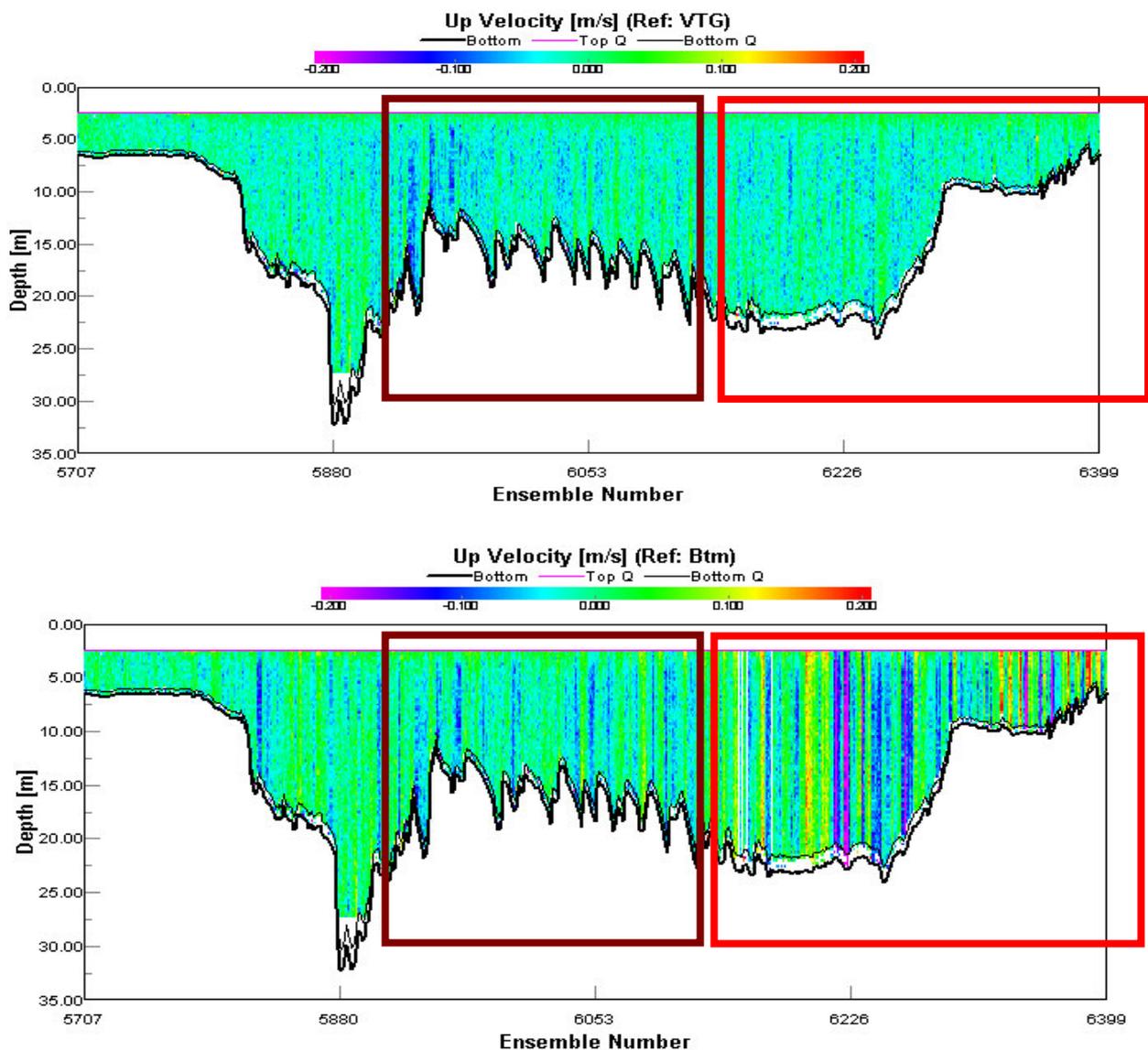


Abb. 4.11: Gegenüberstellung der Unterschiede (roter Kasten) in der vertikalen Strömungskomponente, die ausschließlich durch die Wahl verschiedener Referenzen entstehen: oben GPS-VTG unten BTM. Beispiel aus dem Messgebiet Lister Tief während der Ebbe (Profilnummer 178 vom 23.05.2007), bei der der Gezeitenstrom Änderung der Richtung in der Vertikalen (nach oben vor der Düne und nach unten dahinter) erfährt. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

Die Messergebnisse aus der Referenz mit GPS-VTG sind auf der gesamten Profillänge plausibel, weil eine stärkere hydrodynamische Wechselwirkung bei größeren Gradienten in der Bathymetrie auftritt, siehe brauner Kasten in der Abbildung 4.11 (oben), und eine schwächere bei kleineren Gradienten, siehe roter Kasten in der Abbildung 4.11 (oben). Betrachtet man die vertikalen Komponenten bei der Referenz über BTM, so stellt man ebenfalls plausible Werte in Bereich des braunen Kastens, aber stark überhöhte im letzten Drittel des Profils bis hin zum Ausfall der Ergebnisse für einige Ensembles (weiße vertikale Striche), siehe roter Kasten Abbildung 4.11 (Mitte).

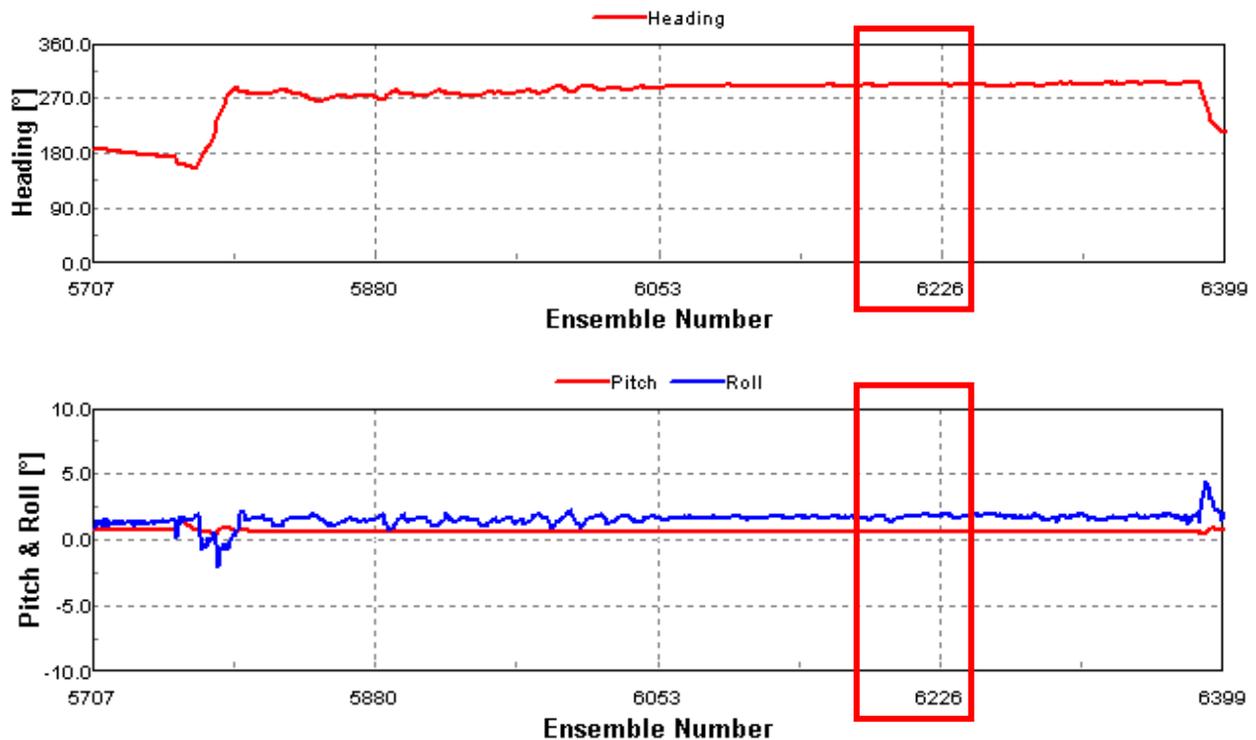


Abb. 4.12: Schiffskurs (oben), Rollen und Stampfen (unten) der Ludwig Prandtl während der Profilfahrt 178 vom 23.05.2007. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

Aus den Erkenntnissen des vorangegangenen Abschnitts könnte z.B. eine Böschungskante, die aufgrund der generalisierenden Tiefenmittelung mit dem ADCP nicht sofort sichtbar ist, als mögliche Ursache vermutet werden. Die Abbildung 4.13, die die Differenzen in der Tiefe (Maximum minus Minimum) pro Ensemble aus allen vier ADCP-Schwingern darstellt, beweist jedoch, dass die größten Tiefengradienten nicht im Bereich der auffälligen vertikalen Strömungskomponente liegen. Das Rollen und Stampfen des Schiffes können nicht als Ursache in Frage kommen, vergleiche Abbildung 4.12. Die Analyse der GPS-Höhen, erfasst und gemittelt auf die Dauer eines Ensembles mit der Software WinRiver-Acquire, ergab einen Hinweis auf die potentielle Quelle. Weil ein PDGPS benutzt wurde und der Empfang der Referenzstation nicht abbricht, entspricht die GPS-Höhenänderung dem Hub (siehe weitere Details Abschnitt 4.2.4) und der Trend (Abfallend in der Zeit), der ebbbedingten Wasserstandsänderung.

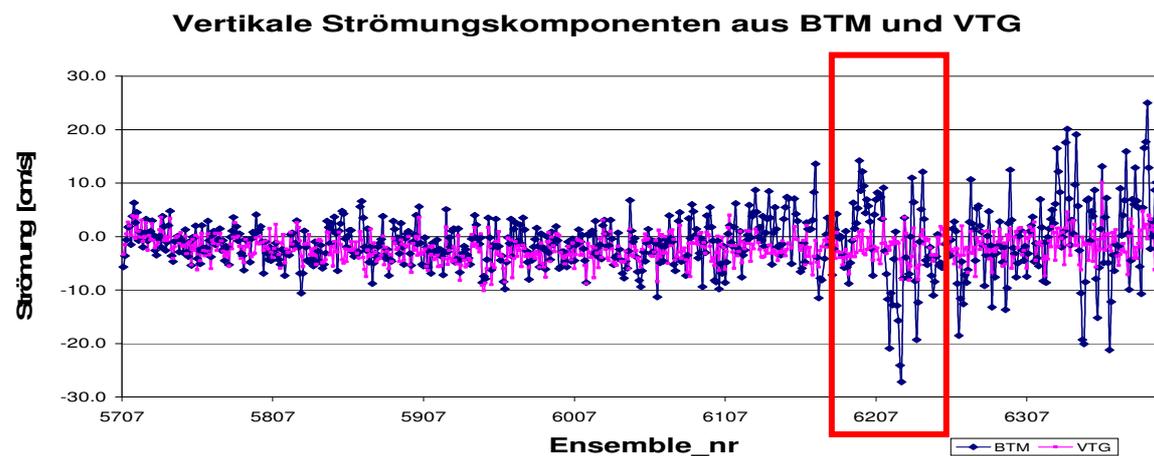
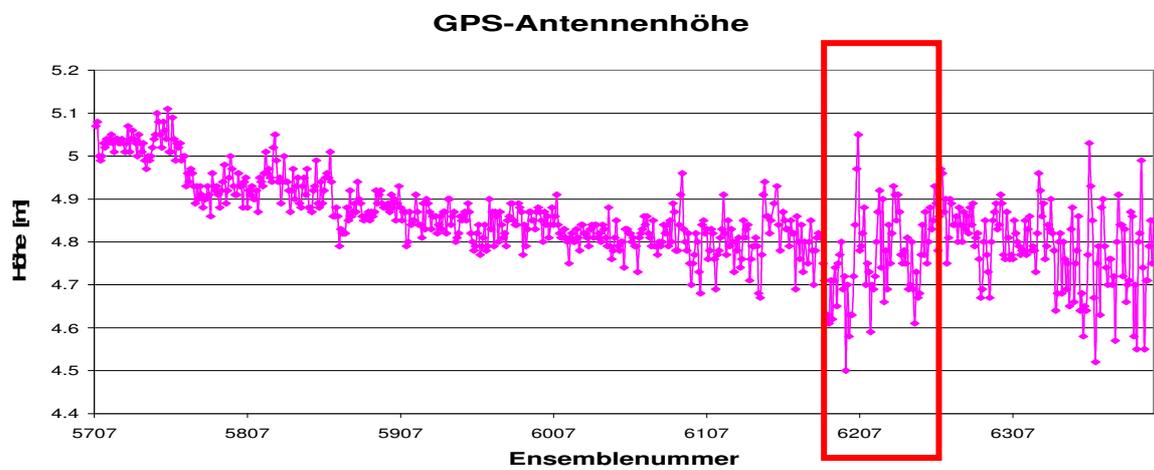
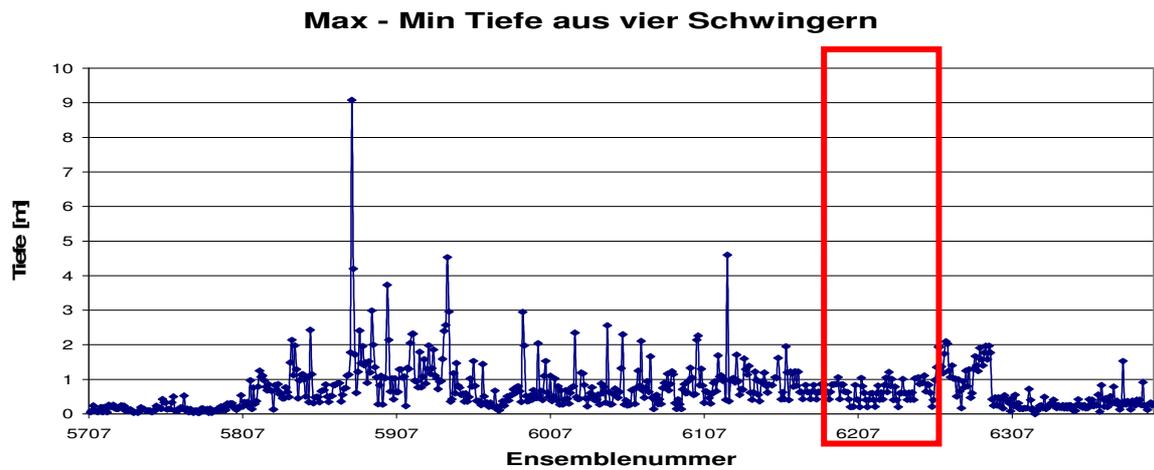


Abb. 4.13: Einfluss des Hubs auf die ADCP-Messung Profilnummer 178 vom 23.05.2007 während Ebbe im Messgebiet Lister Tief.  
 (oben): Tiefdifferenzen Maximum minus Minimum aus allen vier ADCP-Schwingern pro Ensemble.  
 (Mitte): Höhen aus dem GPS-RTK während des Profils 178 vom 23.05.2007.  
 (unten): Vertikale Komponente der Strömung aus dem Layer in 5 m Tiefe referenziert über BTM (blau) und GPS-VTG (rosa)

### Differenz des Betrages zwischen BTM und GPS-VTG

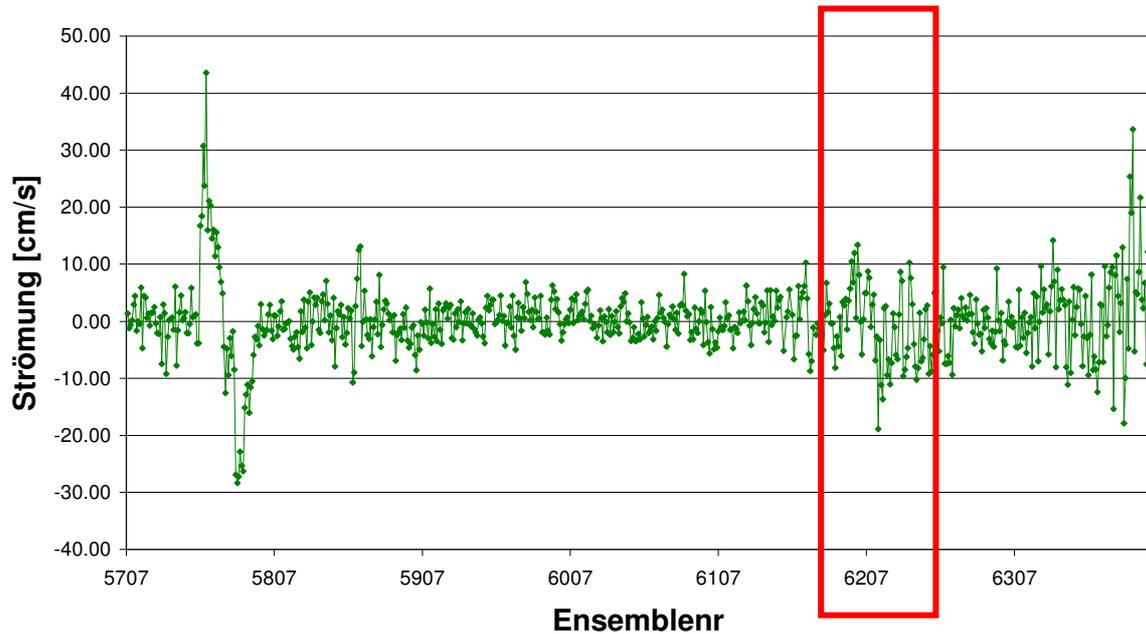


Abb. 4.14: Differenz der horizontalen Strömungsbeträge zwischen Bottom Track und GPS-VTG für den Layer in 5 m Tiefe aus dem Profilnr 178 vom 23.05.2007.

In der Abbildung 4.13 (Mitte) sind mehrfache Senkung und anschließende Hebungen der ADCP-Plattform am Ort der GPS-Masterantenne gemessen worden, siehe roter Kasten. Die dadurch entstandenen relativen Änderungen der Entfernung von dem Wasserkörper und dem Meeresboden, ergeben eine Abweichung in der vertikalen Strömungskomponente von bis zu  $-0,27$  m/s zwischen BTM und GPS-VTG (Abbildung 4.13 roter Kasten unten). Dabei entstand die maximale Differenz im horizontalen Betrag innerhalb des Profilausschnittes (roter Kasten) von  $-0,19$  m/s zwischen BTM und GPS-VTG. Eine auffällige Hebung von  $0,5$  m innerhalb von ca. 15 Sekunden (entspricht der Dauer von fünf Ensembles) führt aber aufgrund ihrer Dauer zu einer Differenz im horizontalen Betrag der Strömung von lediglich  $0,1$  m/s. Offensichtlich ist die Strömungsmessung referenziert über Bottom Track bei vertikalen Bewegungen der ADCP-Plattform während der Messung unzuverlässig. Die Auswirkungen des Hubs scheinen auf die horizontal bestimmten Geschwindigkeiten aus GPS-GGA und GPS-VTG weniger Einfluss zu nehmen und wirken sich daher geringer aus auf die ADCP-Strömungsbestimmung. Durch die Mittelung der GPS-Höhen auf die Ensembledauer kommt es zu einer Glättung und deswegen kann die Ursache dieser vertikalen Bewegung (Squat oder Schwell) nicht eindeutig ermittelt werden kann. Aufgrund der verschiedenen Aufbauorte des ADCP's und der GPS-Antenne ist der Hub an beiden Sensoren nicht identisch.

Shoji Okada von der Kochi National College of Technology in Japan hat ebenfalls die Beobachtung gemacht, dass die Bewegungskorrektur bei RDI nicht optimal gelöst ist und fand empirisch heraus, durch Wippen des Messbootes in einem Wasserbecken mit einem horizontalen Boden, die Optimale Einstellung des 1200 kHz ADCP's. Es stellte sich heraus, dass die

kurzen Oszillationsperioden von 1 Sekunde bei einer Ensembledauer von 0,25 Sekunden vom ADCP-Neigungssensor sehr gut erfasst worden sind (AiA 2009). Der Chairman der Sektion „Water Resources“ während der Konferenz AiA 2009 hat die Absicht des Herstellers RDI einen eigenen externen Bewegungssensor zu bauen bzw. zu integrieren geäußert. Zurzeit (04.01.2011) gibt es auf der Homepage von RDI keine Option einen Bewegungssensor zusätzlich zum ADCP zu bestellen.

Der U.S. Geological Survey empfiehlt in (Mueller & Wagner 2009, Seite 7) bei Schiffseinsätzen die Ensembledauer auf 1 Sekunde zu setzen, da einige ADCP's die Raumwinkel nur am Anfang des Ensembles messen und diesen Wert als Korrektur für das gesamte Ensemble anbringen. Für turbulente und schnellere Gewässer werden Ensembledauern, die kürzer sind als 1 Sekunde empfohlen.

Shoji Okada äußerte in seinem Vortrag außerdem, dass die erste Schätzung der Messgenauigkeit eines ADCP-Datensatzes anhand der Streuung in der Vertikalkomponente vorgenommen werden kann. Seine Beobachtung deckt sich mit den Erfahrungen, die einen Monat zuvor während der Messkampagne im September 2009 in der Nordsee gemacht wurden. ADCP-Messungen zwischen Helgoland (Messgebiet 2) und der Wesermündung bei Wind und Seeegang zeigen deutlich, dass der Einfluss von Roll, Pitch und Hub die Zuverlässigkeit der Strömungsmessung negativ beeinflussen.

In den Abbildungen 4.15 und 4.16 sind die ersten 4 Minuten des Profils 140 vom 23.09.2009 mit der Referenz Bottom Track (oben), GPS-GGA (mitte) und GPS-VTG (unten) abgebildet. Eine Änderung des Betrages der Strömung von ca. 0,3 m/s auf 1,3 m/s zwischen drei benachbarten Ensembles beim BTM mit den Nummern 14369 und 14371, die 15 Sekunden auseinander liegen und einer Entfernung von 45 m entsprechen, wurde beobachtet. Die Strömungsrichtung und die -stärke in der vertikalen Komponente bei diesen drei Ensembles wechselt von -0,8 m/s auf 0,3 m/s. Dieses Gebiet zeichnet sich durch Homogenität in der Strömung aus und hat keine starken Gradienten in der Bathymetrie, sodass diese Schwankungen ausschließlich auf die Bewegung der Plattform zurückgeführt werden können. Wechselt man die Referenz auf GPS-GGA wirkt dieselbe Messung bezüglich der Homogenität in der Strömung plausibler, siehe Abbildungen 4.15 (Mitte) und 4.16 (Mitte). Die vertikalen Komponenten der besagten drei Ensembles wechseln von -0,2 m/s auf 0,2 m/s und der anderen Ensembles in diesem Profilausschnitt zufriedenstellend um  $\pm 0,1$  m/s. Die Referenz GPS-VTG verursacht an dieser Stelle im Betrag der Strömung Sprünge von 0,2 m/s auf 1,1 m/s, in der vertikalen aber lediglich von -0,2 m/s auf 0,2 m/s. Die Bestimmung der Schiffsgeschwindigkeit liefert je nach Referenz verschiedene Ergebnisse, vergleiche Abbildung 4.17. Am stärksten verrauscht ist die BTM-Lösung und am wenigsten die GPS-GGA. Da die Schiffsgeschwindigkeit von der radialen Messung subtrahiert wird, ist die Zuverlässigkeit der Schiffsgeschwindigkeit eine Grundvoraussetzung.

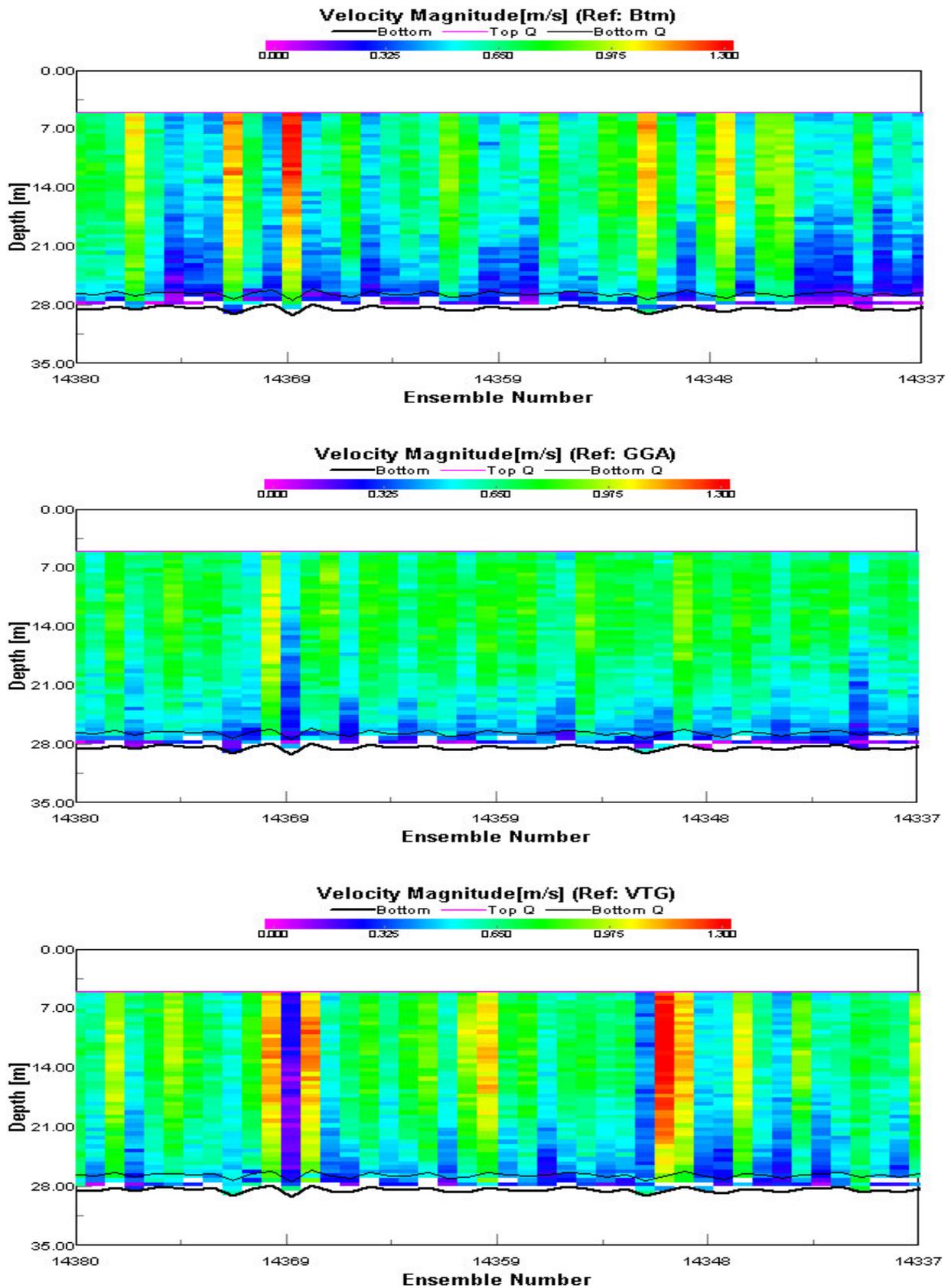


Abb. 4.15: Unterschiedliche Messergebnisse des *horizontalen Betrages der Strömung*, die durch die Verwendung von verschiedenen Referenzen *BTM* (oben), *GPS-GGA* (mitte) und *GPS-VTG* (unten) unter Einfluss von Roll, Pitch und Hub bei einer Seegangssituation. Datensatznummer 140 aus dem Messgebiet 2 (zwischen Helgoland und der Wesermündung) vom 23.09.2009. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

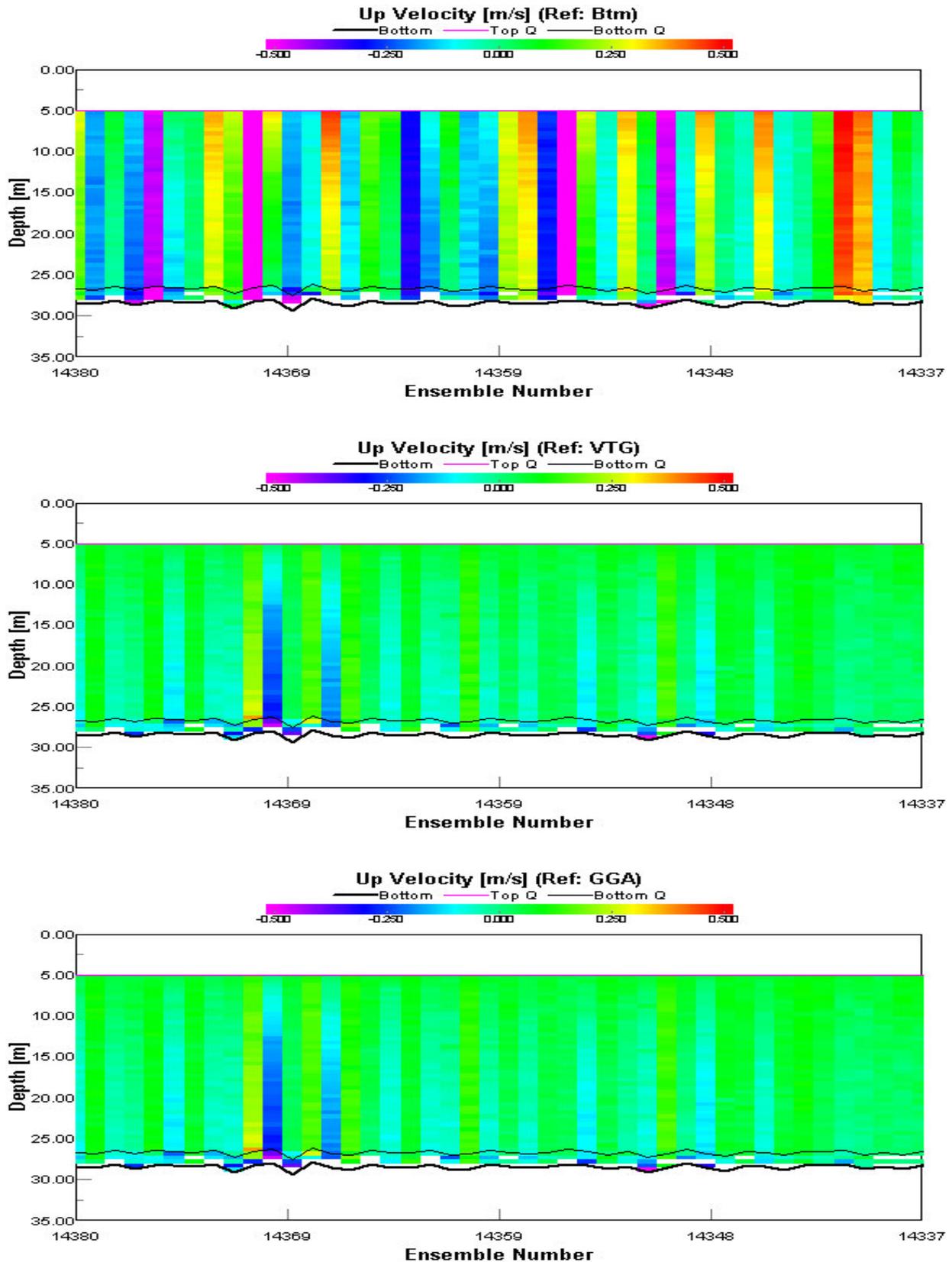


Abb. 4.16: Unterschiedliche Messergebnisse der *vertikalen Strömungskomponente*, die durch die Verwendung von verschiedenen Referenzen *BTM* (oben), *GPS-GGA* (mitte) und *GPS-VTG* (unten) unter Einfluss von Roll, Pitch und Hub bei einer Seegangssituation entstehen. Datensatznummer 140 aus dem Messgebiet 2 (zwischen Helgoland und der Wesermündung) vom 23.09.2009. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

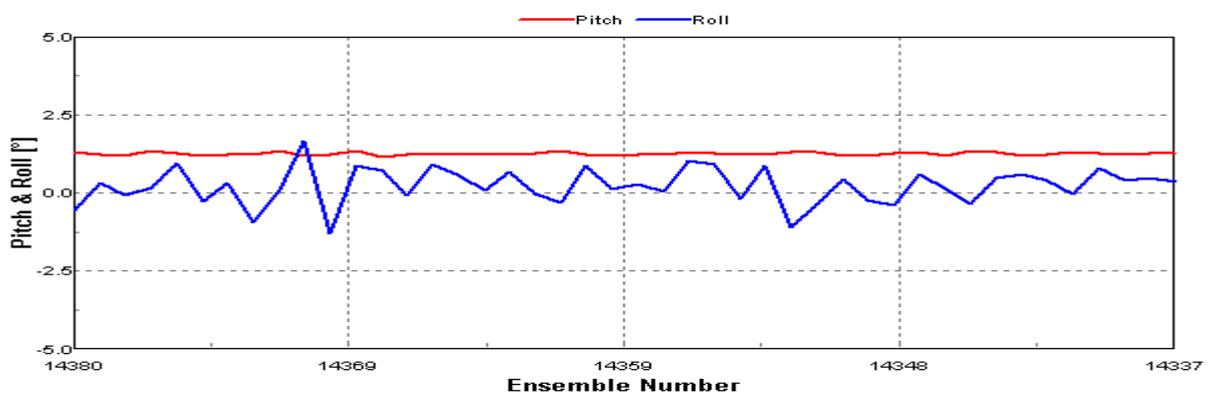
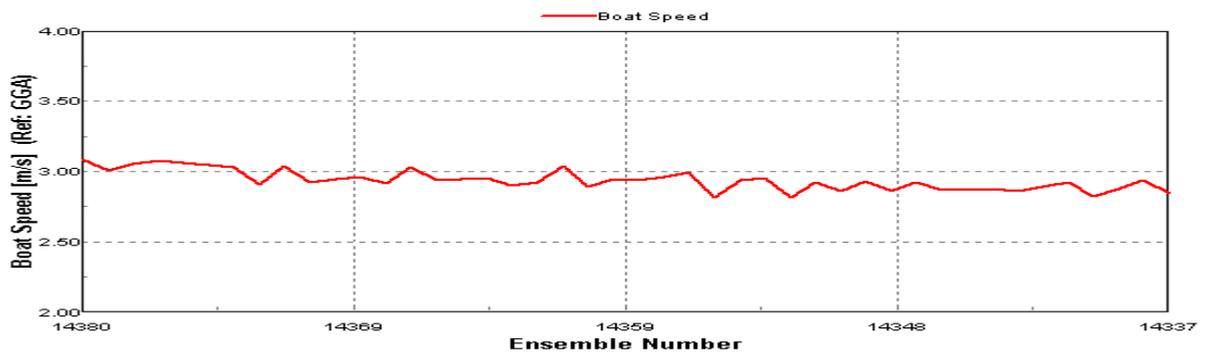
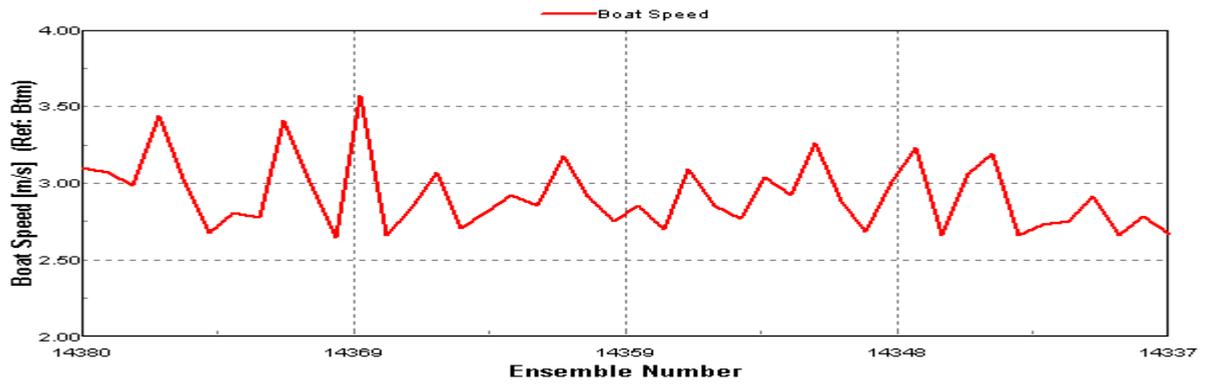


Abb. 4.17: Unterschiedliche Messergebnisse bei der Bestimmung der Schiffsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Referenz *BTM* (oben), *GPS-GGA* (obere Mitte) und *GPS-VTG* (untere Mitte). Die Neigung der Plattform (Roll und Pitch) erfasst durch den ADCP-Sensor (Bild unten). Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

Die Änderung des Rollwinkels zwischen zwei benachbarten Ensembles ab ca.  $3^\circ$  scheint bei allen drei Referenzen Sprünge in der Strömungsmessung entstehen zu lassen, am stärksten wirkt sich dieser jedoch bei der Bottom Tack Methode aus. Welcher Anteil an diesen Variationen in der Strömungsbestimmung auf den Hub des Schiffes innerhalb eines Ensembles entfällt, kann man den Kontrollfenstern in der Software WinRiver nicht entnehmen. Obwohl diese Software die GPS-Höheninformation aus GPS-GGA speichert und die Höhenänderungen innerhalb des gesamten Profils auf dem Bildschirm anzeigt, ist die Software nicht in der Lage den Hub der Messplattform pro Ensemble aus der GPS-Höhe zu bestimmen bzw. Daten von einem externen Bewegungssensor zu verarbeiten. Daher wurden eigene Untersuchungen vorgenommen, um die Eignung der GPS-Höheninformation auf Korrekturmöglichkeit zu überprüfen.

#### **4.2.4 Hub aus GPS**

Das während der Messkampagne September 2009 verwendete Zweifrequenz-GPS empfing keine Korrekturen, sodass die Höhenmessung aufgrund ihrer absoluten Ungenauigkeit (einige Dezimeter) zur präzisen hydrographischen Vermessung nicht geeignet ist, vergleiche Tabelle 3.3. Die relativen Höhenänderungen innerhalb der Ensembledauer (hier 6 Sekunden) sind eventuell von ihrer Genauigkeit her ausreichend, um den Hub aus den Höheninformationen des GPS-GGA-Strings zu berechnen. Hierzu wurden aus einer mehrtägigen statischen Messung (GPS-Antenne montiert auf einem Gebäudedach) mit diesem Gerät je eine Stunde mit RTK-Empfang und ohne Korrekturmpfang (Stand Alone) extrahiert und auf die zu erwartende Genauigkeit geprüft. Die Dauer dieser Ausschnitte entspricht der ungefähren Dauer der ADCP-Profile während der Messkampagnen.

Zunächst wurde die RTK-Messung ausgewertet und der Messreihenausschnitt auf seine Stetigkeit untersucht. Die Höhenänderungen innerhalb der 3600 Sekunden liegen im cm-Bereich, siehe Abbildung 4.18. Die Differenz zwischen dem maximalen und dem minimalen Höhenwert in der gesamten Messreihe von 3600 Sekunden beträgt 5 cm, die Standardabweichung liegt bei 0,8 cm. Die Qualitätsmerkmale Satellitenanzahl und der HDOP-Wert für diese Messreihe sind in der Abbildung 4.19 dargestellt. Diese Messreihe wurde anschließend in 6 Sekundenintervalle unterteilt (~Ensembledauer) und Höhenänderungen (Maximum - Minimum) innerhalb dieser Intervalle betragen maximal 1,5 cm und der häufigste Differenzwert liegt bei 0,6 cm, vergleiche Histogramm in der Abbildung 4.20. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Höhenänderungen gemessen mit GPS-RTK ausreichende Genauigkeit bieten, um den Hub des Schiffes, der die ADCP-Strömungsmessung überlagert, von den tatsächlichen vertikalen Änderungen in der Wassersäule unterschieden zu können, die zwischen 5 cm/s bis 20 cm/s liegen (vergleiche Abb. 4.11)

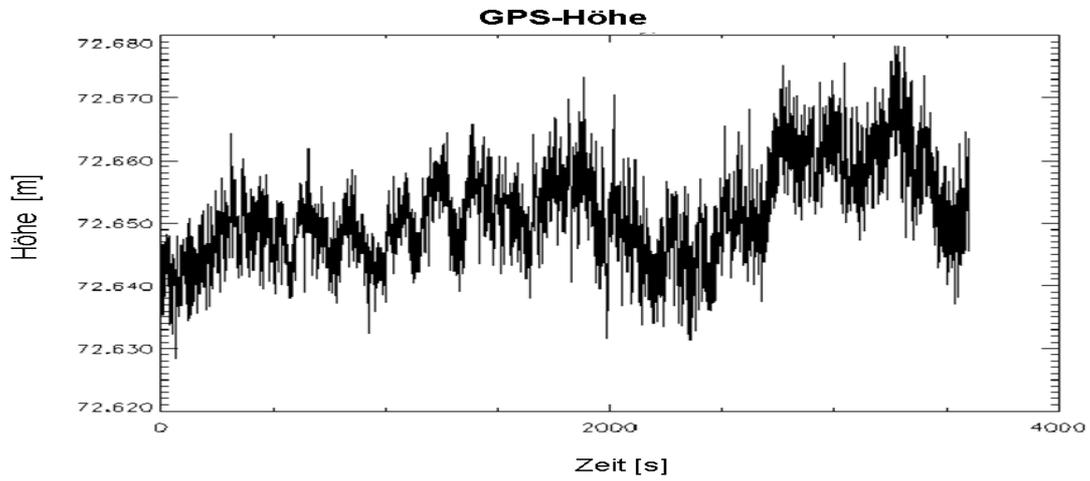


Abb. 4.18: Zeitserie der **RTK-GPS-Höhen** während einer stationären Messung mit der Dauer von 3600 Sekunden, Datenausgabe 1Hz

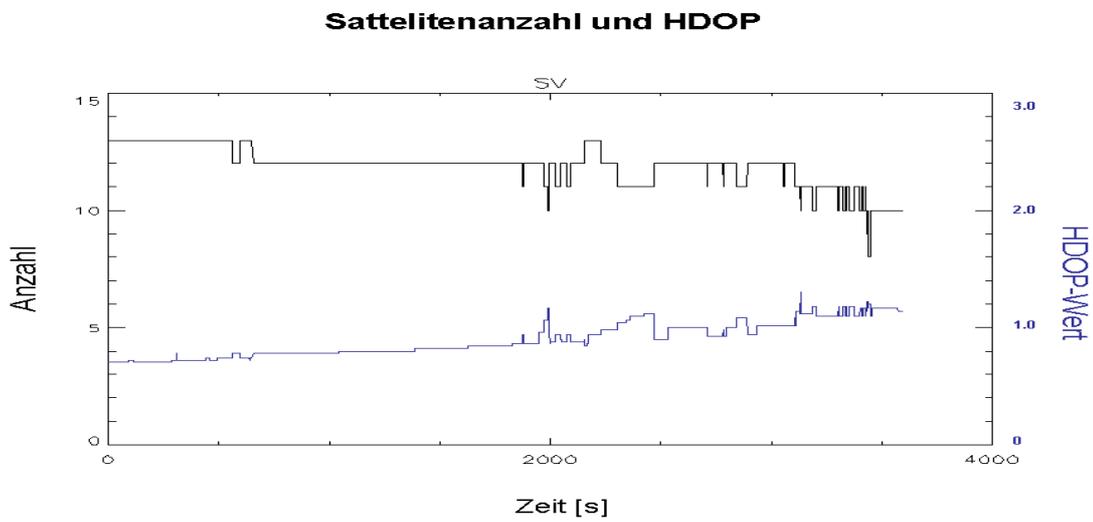


Abb. 4.19: Satellitenanzahl (schwarze Linie) und der HDOP-Wert (in blau) der stationären **RTK-GPS-Höhenbestimmung**

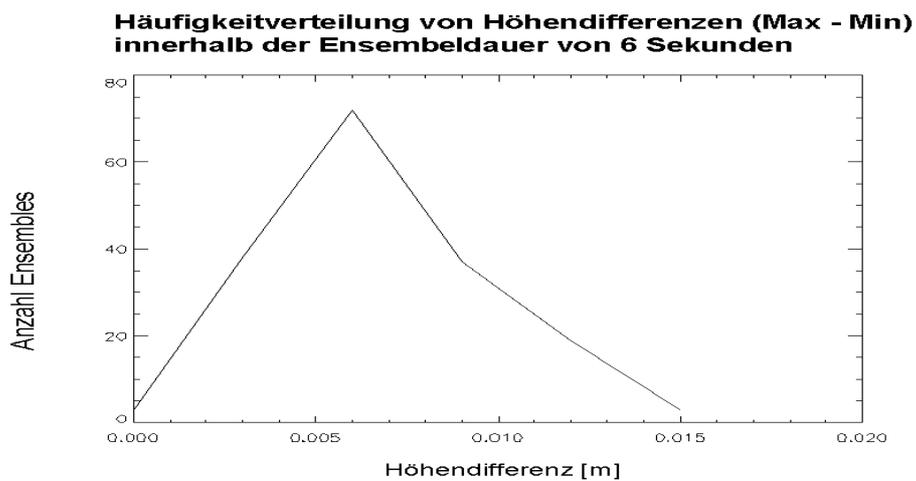


Abb. 4.20: Häufigkeitsverteilung der **RTK-Höhendifferenzen (Max -Min)** innerhalb eines Ensembles mit der Dauer von 6 Sekunden

Die Auswertung der statischen Stand Alone-GPS Messung, siehe Abbildung 4.21, zeigt stärkere Schwankungen in der Höhenbestimmung als die RTK-Messung und es treten zahlreiche Aussetzer auf. Während der Analyse der vorhandenen Qualitätsangaben aus dem GGA-String hat sich herausgestellt, dass einige Sprünge bei Veränderungen der verwendeten Satteliten zu Ortsbestimmung (3D) entstehen. Bei diesem Sattelitenwechsel verändern sich häufig der HDOP-Wert und die Gesamtanzahl der Satelliten, siehe Abbildung 4.22. Für die simulierte Ensemblemittelung auf 6 Sekunden wurde ein Datenfilter aufgesetzt, der die Separation von „guten“ Datensätzen nach folgenden Kriterien für jedes Ensemble durchgeführt hat:

- kein Satellitenwechsel
- Satellitenanzahl > 13
- HDOP maximal 0.9
- keine Veränderung im HDOP

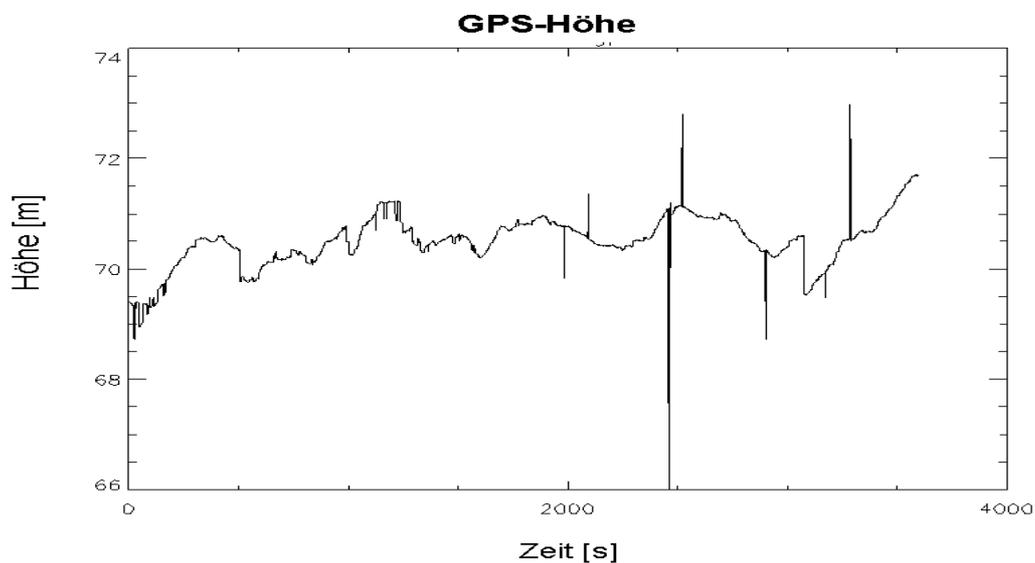


Abb. 4.21: Zeitserie der GPS-Höhen während einer stationären Messung **ohne** GPS-Korrekturen mit der Dauer von 3600 Sekunden, Datenausgabe 1Hz.

Das Ergebnis dieser Berechnung sind Differenzen zwischen dem maximalen und dem minimalen Höhenwert innerhalb eines Ensembles, siehe Abbildung 4.23. Die Standardabweichung von 6 cm und der Mittelwert von 4 cm für alle „guten“ Ergebnisse in der Abbildung 4.22 erscheinen zunächst gering, sind aber ein Vierfaches der Werte aus der präzisen RTK-Messung. Die häufigen Höhendifferenzen zwischen 0,1 m und 0,4 m bei dieser stationären Messung innerhalb von 6 Sekunden, beweisen, dass die Qualität der Höheninformation aus einer Stand Alone GPS-Messung, selbst mit den strengen Filterungskriterien, nicht ausreichend ist, um zuverlässig den Hub der Plattform vom Messrauschen zu unterscheiden. Aus diesem Grunde wurde verzichtet, innerhalb der GPS-Daten der Messkampagne September 2009 (Abbildungen 34 bis 36) die Schwankungen in der vertikalen ADCP-Strömungsmessung mit dem GPS-Hub zu korrelieren.

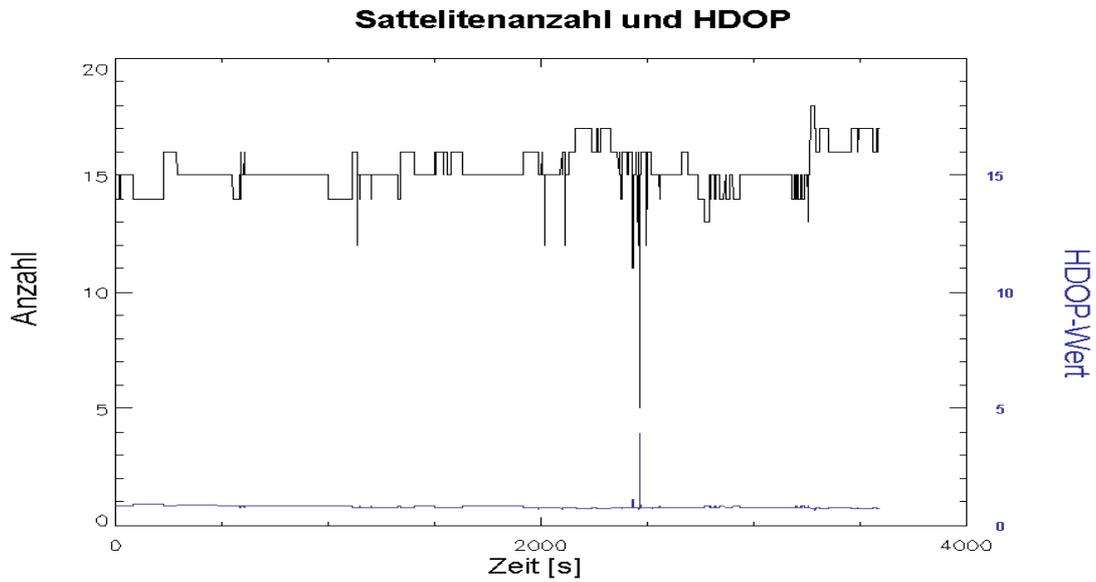


Abb. 4.22: Sattelitenanzahl (schwarze Linie) und der HDOP-Wert (in blau) während der GPS-Höhenbestimmung **ohne** GPS-Korrekturen

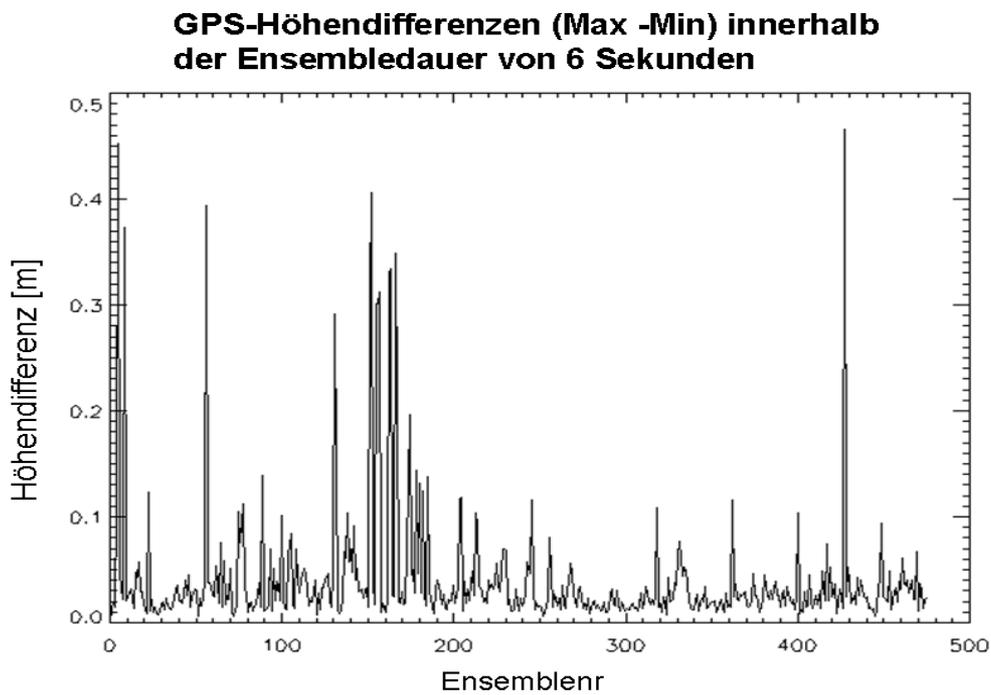


Abb. 4.23: Differenzen (Maximum - Minimum) in den Höhen innerhalb von Ensembles (Dauer je 6 Sekunden) bei der stationären GPS Stand Alone Messung.

#### 4.2.5 Fazit des Referenzenvergleichs

Anhand der Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Abschnitten über die Korrektur des Einbaufehlers, Einfluss des Salzgehaltes in Kombination mit den Referenzen im Referenzenvergleich, können folgende Fragen aus dem Kapitel 3 beantwortet werden, die wie folgt lauten:

**Frage 1:** Welche Referenz Bottom Track, GPS-GGA oder GPS-VTG ist geeigneter für die ADCP-Messung in den drei Messgebieten?

**Frage 6:** Welchen Einfluss hat die Plattformbewegung auf die ADCP-Messung und wie ist der Zusammenhang dieser Bewegung zu der Referenz?

Die Antwort auf beide Fragen lautet: „es kommt darauf an“:

- 1.) In Gebieten ohne Seegangseinfluss d.h. ohne Hub, Rollen und Stampfen der Plattform und ohne Gradienten in der Bathymetrie (Böschungen, Sanddünen) kann Bottom Track verwendet werden, ansonsten wirken sich die relativen Änderungen in der Tiefe (Hub und Steigungen des Meeresbodens) negativ auf die Zuverlässigkeit der Strömungsmessung aus.
- 2.) Die Genauigkeit der Referenz GPS-GGA ist stark von der Qualität der Korrektursignale abhängig. Aufgrund der offenbar geringeren „Empfindlichkeit“ gegenüber der seegangsinduzierten Plattformbewegungen ist diese Lösung auch ohne GPS-Korrektursignale eine empfehlenswerten Methode (kleinere horizontale Änderung der Schiffsgeschwindigkeit als BTM oder GPS-VTG).
- 3.) Referenz GPS-VTG ist aufgrund der Bestimmungsmethode der Plattformgeschwindigkeit weniger abhängig von den Referenzstationen und von der Mehrwegeausbreitung als das GPS-GGA. Kleine Hübe der Plattform (bis 0,2 m pro 3 Sekunden) wirken sich bei dieser horizontalen Strömungsgeschwindigkeit nicht negativ aus. Größere Hub-, Roll- und Stampfbewegungen, bei denen das Messschiff umgangssprachlich „auf den Wellen reitet“, erzeugen offensichtlich verschiedene Geschwindigkeiten innerhalb der Dauer eines Ensembles von mehreren Sekunden, die im Mittelwert zu Sprüngen in der ADCP-Strömungsmessung führen kann.

In diesem Zusammenhang kann auch eine weitere Frage beantwortet werden:

**Frage 4:** Weshalb sind die ADCP-Schlauchbootmessungen mit baugleichem ADCP-Gerät in demselben Messgebiet verrauschter im Vergleich zu der Prandtlmessung?

Vergleicht man die Schwankungen der vertikalen Strömungskomponente vom Schlauchboot aus mit der aus der Prandtlmessung in der Abbildung 30 (unten), so stellt man Parallelen fest, d.h. eine der Ursachen ist der Hub, siehe Abbildung 42. Die Änderung in der Höhe zweier aufeinanderfolgender Ensembles mit der durchschnittlichen Dauer von 3 Sekunden, überschreitet sehr häufig den Wert von  $\pm 0,2$  m.

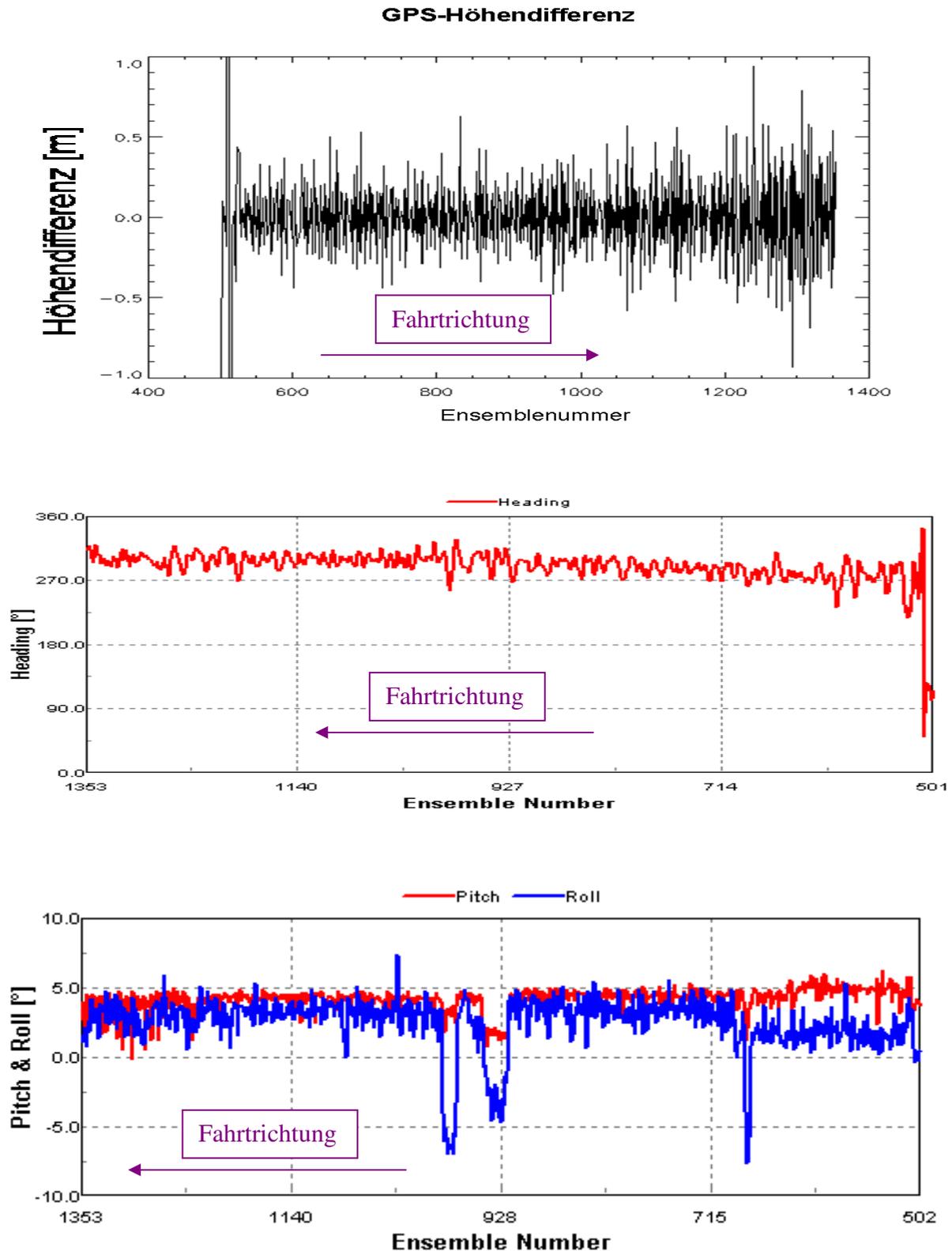


Abb. 4.24: Bewegung des Schlauchbootes beim Profil 003 vom 22.05.2007 im Lister Tief.  
(Oben): RTK-Höhendifferenzen zweier aufeinanderfolgender Ensembles (Dauer je 3 Sekunden)  
(Mitte): Änderung des mittleren Kurses pro Ensemble  
(unten): Mittelwerte des Stampfen- und Rollwinkels pro Ensemble  
Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

Betrachtet man zusätzlich die Lagewinkel des Bootes Rollen, Stampfen und das Heading, so stellt man eine stärkere Änderung der Mittelwerte pro Ensemble sowie von einem Ensemble zum nächsten als z.B. bei dem größeren Schiff L.Prandtl. Eine Lösung hierfür wäre, laut der bereits erwähnten Empfehlungen, die Ensemblezeiten auf 1 Sekunde oder kürzer zu setzen, um den Einfluss der Bewegungen des leichten Schlauchbootes zu minimieren. Dies wäre wahrscheinlich nicht notwendig gewesen, wenn die Software WinRiver-Acquire jeden Ping mit der Änderung der Lagewinkel korrigieren würde, anstatt am Ende des Ensembles mit den Mittelwerten innerhalb der Ensembledauer.

Die letzte Frage, die in diesem Abschnitt beantwortet werden kann, lautet:

**Frage 7:** Besteht die Möglichkeit die Schallgeschwindigkeit abzuschätzen und wenn ja, welche Unsicherheit folgt für die Strömungsbestimmung?

Die Überquerung der Elbe bei Cuxhaven im Profil 041 vom 2010.06.06 erfolgte ca. 60 Minuten nach Hochwasser. Legt man den Bottom Track und den GPS-GGA Track übereinander, sodass die Profilen deckungsgleich sind, muss für den Salzgehalt der Wert 12 ‰ eingegeben werden. Mit freundlicher Unterstützung der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg wurden typische Salzgehalte für verschiedene Tidephasen in diesem Messgebiet zur Verfügung gestellt (siehe Anhang F2). Die vertikalen CTD-Profile der BAW ergaben für eine Messung zur gleichen Tidephase 8 Tage später ein Salzgehalt von ca. 7 ‰ an der Wasseroberfläche und 10 ‰ in 10 m Tiefe. Die Wassertemperatur betrug in beiden Fällen 15 °C also zu vergleichbaren hydroakustischen Bedingungen. Die Schallgeschwindigkeit erhöht sich beim Anstieg des Salzgehaltes von 7 ‰ auf 12 ‰ bei 15 °C Wassertemperatur um lediglich +6 m/s, was für die Tiefenmessung in der Elbe einen vernachlässigbaren Fehler in der Tiefenermittlung von ca. 0,1 m ausmacht und 0,02 m/s bei der Strömung im analysierten Profil.

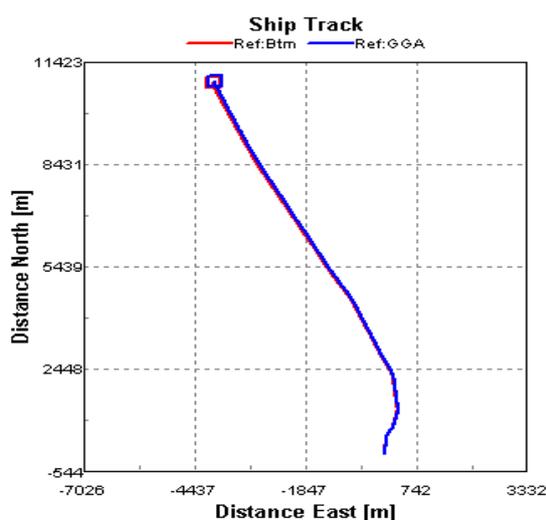


Abb. 4.25: Ergebnis der empirischen Ermittlung des Beam 3 Einbaufelers und der Schallgeschwindigkeit beim Überqueren der Elbe. Bei einem Salzgehalt von 12 ‰ konnten die Trackenden aus dem GPS-GGA und BTM zu Deckung gebracht werden. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

Es gibt eine Reihe von wissenschaftlichen Publikationen und amtlichen Regelwerken, die das Bottom Tracking wegen der schlechten Genauigkeit der GPS-Lösungen in der Vergangenheit favorisieren. In (Griffiths 1997, Fig. 7) sieht man deutlich, dass nach einer 30 stündigen Profilmessung und 227 zurückgelegten Kilometern im Atlantik die Endposition vom GPS-GGA und der aus dem BTM um 2 km differieren. Der Autor dieses Artikels ist mit diesem Ergebnis zufrieden. Vergleicht man die Abbildung 4.2 im Abschnitt 4.1.1 mit der in (Griffiths 1997, Fig. 7), stellt man eine Ähnlichkeit fest. Eventuell müsste die Schallgeschwindigkeit und der Beam 3 Einbaufehler bei der Atlantikreise korrigiert um anschließend die beiden Tracks erneut im gemeinsamen Plot dargestellt werden. Bei einer Verbesserung des Ergebnisses (kleinere Distanzdifferenz am Ende des Profils) müsste die Auswirkung auf die Strömungsmessung festgestellt und möglicherweise dieser Datensatz neuprozessiert werden.

In (Environment Canada 2004, Fig. 3) wird ein Beispiel für den Einfluss der bewegten Flusssohle dargestellt. Der Einfluss vom fehlerhaft bestimmten Beam 3 Einbaufehler wirkt sich im „Combo Ship Track“-Fenster aber identisch aus. Um die wahre Ursache herauszufinden, muss der Fluss oder der Gezeitenkanal lediglich zwei Mal überquert werden (hin und zurück). Der Beam 3 Einbaufehler ist ein systematischer Fehler und der Weg über BTM erscheint im Fenster „Combo Ship Track“ jeweils auf derselben Seite z.B. rechts vom GPS-GGA Track bei beiden Fahrten hin und zurück. Wenn es tatsächlich der Einfluss von der Sedimentbewegung am Gewässerboden ist, erscheint der Weg über BTM bei der Hinfahrt z.B. rechts von dem GPS-GGA Track auf der Rückfahrt links vom GPS-GGA Track. Mit der empirischen Korrektur des Beam 3 Einbaufehlers wird auch ein eventueller Kompassfehler mitkorrigiert, da dieser in der Summe der Winkel, die zur absoluten Orientierung des ADCP's notwendig sind, beiträgt.

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde organisiert regelmäßig das „ADCP Anwendertreffen zur Qualitätssicherung von Abflussdaten“. Bei diesen Treffen wurde in der Vergangenheit mehrfach deutlich, dass das Benutzen von GPS-Geräten eine zusätzliche Fehlerquelle darstellen kann (BFG 2004) und der Vergleich mit den Sollwerten (für den Durchfluss) erst im Jahre 2007 in dem RTK Systeme verwendet wurden (Anhang H: BFG-Email vom 18.10.2010), gelang es gute Ergebnisse mit der Referenz GPS-VTG zu erzielen (BFG 2007).

Die Software WinRiver überprüft laufend die GPS-Strings und warnt in Echtzeit im Fenster „GPS Tabular“ falls Störungen auftreten oder die Qualität sich verändert. So wird z.B. der Satellitenwechsel überwacht und ab der Anzahl 4 in Rot als Warnung dargestellt. Aus der Auswertung der stationären RTK-Messung ist bekannt, dass der Sattelitenwechsel (schwankende Anzahl der Satelliten zwischen 15 und 8 in den ausgewerteten 60 Minuten) bei Verwendung von Referenzstationen keine dramatische Verschlechterung bedeuten muss, siehe Abbildung 4.19. Die Warnungen über Änderung der GPS-Höhe, HDOP und weiterer Qualitätskriterien beziehen sich bei WinRiver nicht auf die Änderungen innerhalb eines Ensembles, sondern fürs gesamte Profil. Eine Änderung des Wasserstands in Gezeitengewässern bewirkt automatisch eine Änderung der GPS-Höhe und bedeutet nicht zwingend eine schlechtere

GPS-Qualität. Der Typ und die Qualität der GPS-Korrekturen werden dabei nicht berücksichtigt. Die Konkurrenzsoftware von SonTek ist an dieser Stelle fortschrittlicher und bietet z.B. die Integration und automatisches Umschalten der GPS-Korrekturempfänger auf die momentan beste Lösung, siehe Details im Abschnitt 2.10.

Diese Zusatzinformationen über die momentane GPS-Qualität werden notwendig, wenn die ADCP-Messungen auf ein absolutes Höhenniveau wie Normalnull, Seekartennull oder Pegelnull bezogen werden müssen. Hierbei ist das Verhalten des Bootes während der Messfahrt wie Squat (Setzung und Vertrimmung) zu berücksichtigen und z.B. den Anteil der Setzung mit der Höhe aus der RTK-Messung zu korrigieren. Die konstante Schräglage des ADCP-Topfes während der Beschleunigung (Squateffekt) des Schiffes oder beim nicht Lotrechten ADCP-Einbau wird durch den ADCP-Neigungsensor erfasst und ausgeglichen, sodass die Tiefenzuordnung der Zellen korrekt ist. Eine Beschleunigung verursacht aber häufig eine Veränderung der Lage während eines Ensembles, was eine zusätzliche Dopplerverschiebung bedeutet, die dann die ADCP-Messung verfälscht. In (Environment Canada 2004) wird empfohlen diejenigen Messungen, die im Mittelwert den Wert  $\pm 5^\circ$  fürs Rollen und/oder Stampfen überschreiten als kritisch anzusehen. In der Abbildung 4.12 sieht man, dass eine Lageänderung von ca.  $3^\circ$  zwischen zwei Ensembles bereits zur abweichenden Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit führt, da die Änderung der Lagewinkel innerhalb eines Ensembles auf die ADCP-Messung Einfluss hat.

Daher eine Anforderung aus diesem Abschnitt an eine „gute“ ADCP-Datenerfassungssoftware:

***„Messung und Korrektur der Lageraumwinkel und des Hubes an jedem gesendeten Ping und erst danach eine Zusammenfassung der Messergebnisse in einem Ensemble“***

Aufgrund der hohen Dynamik und der zahlreichen Gradienten in der Bathymetrie sowie des Fehlens vom Vertikallot in den verwendeten RDI ADCP-Geräten, wurde entschieden im Messgebiet 1 Lister Tief und 3 der Elbmündung, solange das GPS zuverlässige Daten lieferte (konstanter RTK-Empfang) alle ADCP-Messungen mit GPS-VTG zu referenzieren. Die Nordseemessung bei Seegang (Messgebiet 3) werden mit GPS-GGA referenziert.

### 4.3 Zeitstempelkorrektur

Jedes ADCP hat eine interne Uhr, die mit einer Präzision von 0.01 Sekunden arbeitet. Diese Uhr kann aber driften und eine Verspätung von einigen Sekunden pro Monat verursachen (WRUG 2003). Da der Zeitstempel der ADCP Daten von dieser Uhr stammt, ist es notwendig vor Beginn der Messung die interne Uhr auf UTC zu setzen und zu aktualisieren. Die persönliche Erfahrung zeigt, dass dieses nicht immer durchgeführt worden ist und eine Zeitdifferenz von bis zu 8 Stunden beobachtet wurde. Diese große Zeitdifferenz führte zeitweise zusätzlich zu einem fehlerhaften Datum in den Messdaten und musste anhand der GPS-Navigationsdaten korrigiert werden. Hierzu wurde der erste GGA-String aus der Navigationsdatei ausgewählt, mit dem Zeitstempel aus dem ersten Ensembleheader verglichen und entsprechend korrigiert. Die genauere Analyse der Zeitdifferenzen aus mehreren Kampagnen und Konfigurationen ergab, dass die Beschreibung der Zeitstempelung in der Bedienungsanleitung des Programms WinRiver (Zeitstempel = Beginn des Ensembles) nicht der Realität entspricht. Die Zeitstempelung erfolgte am Ende des Ensembles. Die Korrektur des Datums erfolgte automatisch, falls notwendig. Seit September 2009 wurde aufgrund der 24h Messungen während der Messkampagnen zusätzlich das ZDA-Telegramm am GPS mit ausgegeben, siehe Flussdiagramm in der Abbildung 20 (*adcp\_timecorr.pro*).

### 4.4 Positionsoffsets und Koordinatentransformation

Die lokalen Koordinatensysteme an Bord der Messplattformen sind in der Abbildung 3.11 bei den Masterantennen mit gestrichelter Linie dargestellt und haben folgende Orientierung: Abszisse parallel zur Schiffsachse positiv zum Bug und die Ordinate positiv in Richtung Steuerbord. Die Software WinRiver bietet keine Möglichkeit zur Korrektur der Positionsoffsets zwischen GPS-Masterantenne und dem ADCP-Einbauschacht. Aus diesem Grunde wurde eine Subroutine (*adcp\_posoffset.pro*) zu Korrektur dieser Offsets implementiert, die über eine Koordinatentransformation der Positionen der GPS-Masterantenne in das metrische und winkeltreue Gauss-Krueger-Koordinatensystem und der Offsets aus der Tabelle 3.3, die Position des ADCP-Sensors bestimmt.

Zunächst wurden an dieser Stelle die ellipsoidischen Koordinaten aus dem GPS-GGA-String (GPS-Masterantenne), die sich auf das geozentrisch gelagerte Ellipsoid WGS-84 beziehen, mithilfe der 7-Parameter-Transformation auf das Bessel-Ellipsoid transformiert, um anschließend in das winkelonforme und metrische Gauss-Krueger-Koordinatensystem projiziert zu werden. Hierzu wurden die Parameter der jeweiligen Ellipsoide wie große Halbachse  $a$ , kleine Halbachse  $b$  und die Abplattung  $1/f$  verwendet. Mit Hilfe der 7-Parametertransform wird der Übergang vom dem ursprünglichen geozentrischen Ellipsoids auf das lokal bestanpassende Zielellipsoid (hier Bessel) realisiert. Die sieben Parameter sind: Verschiebung ( $dx$ ,  $dy$  und  $dz$ ), Rotationen der Achsen ( $ex$ ,  $ey$  und  $ez$ ) und der Maßstabsfaktor  $dm$ . Die ellipsoidischen Bessel-Koordinaten werden anschließend in die Ebene nach Gauss-Krüger (**GK**) projiziert.

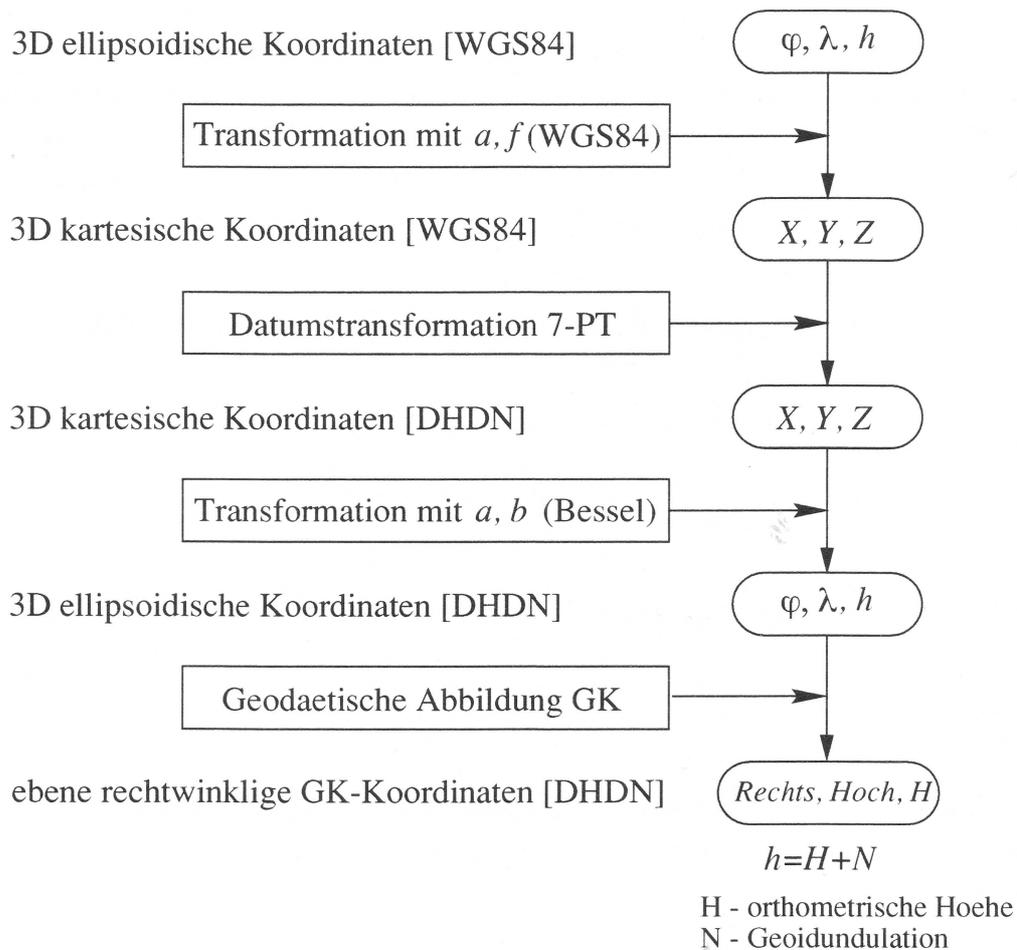


Abb. 4.26: GPS-Koordinatentransformation in das Koordinatensystem Gauss-Krüger. In Anlehnung an (Egge 2000) zusammengestellt in (Prinz 2003).

Das Ergebnis sind rechtwinklige Koordinaten (Rechtswert und Hochwert) der GPS-Masterantenne, vergleiche Abbildung 44. Die Position des Sensors ADCP wird polar an die GK-Position der GPS-Masterantenne angehängt. Hierzu werden die Werte aus der Tabelle 3.3 und dem Schiffskurs (Heading) benötigt. Dabei musste vorab der Schiffskurs für das Gauss-Krüger-Koordinatensystem korrigiert werden. In (Cysewski 2003) wurde nachgewiesen, dass nur die ebene Gaußsche Meridiankonvergenz relevant ist (Korrektur  $\gg 0.1^\circ$ ), da die Lotabweichung im Bereich von wenigen Bruchteilen einer Bogensekunde liegt. Weil die ADCP-Messungen an der Meeresoberfläche stattfanden, ergab die Reduktion aufgrund der Höhe des Zielpunktes über dem Meeresniveau für das Besselipsoid nach (Großmann 1964) ebenfalls keine relevanten Verbesserungen. Die Horizontalwinkel werden zwischen Vertikalschnittbögen beobachtet und es muss beim Übergang auf die geodätische Linie eine Korrektur angebracht werden, die aber nach (Großmann 1964) ebenfalls die Größenordnungen von Bruchteilen einer Bogensekunde erreichen und dadurch vernachlässigt werden können.

Zwischen der Nordrichtung auf dem Besselipsoid (GeoN) und der Nordrichtung Gitternord (GiN) der konformen GK-Abbildung besteht eine Richtungsdivergenz, die ebene Gaußsche Meridiankonvergenz  $c$  genannt wird. Der Betrag dieser Meridiankonvergenz wächst mit der Entfernung vom Hauptmeridian  $l$  und der geographischen Breite  $\varphi$ .

Diese Meridiankonvergenz  $c$  berechnet sich nach (Großmann 1964):

$$c_g = l \sin \varphi + \frac{l^3}{3\rho^2} \sin \varphi \cos^2 \varphi (1+3\eta^2) \quad (4.3)$$

mit:

$$\eta^2 = \frac{e^2 \cos^2 \varphi}{1 - e^2}$$

$$l = \lambda_e - \lambda_0$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$$

wobei:

$c_g$  := ebene Gaußsche Meridiankonvergenz im Bogenmaß

$l$  := Entfernung vom Hauptmeridian im Bogenmaß

$\lambda_e$  := ellipsoidische Länge im Bogenmaß

$\varphi$  := ellipsoidische Breite im Bogenmaß

$\lambda_0$  := Hauptmeridian des GK-Streifens (hier  $9^\circ$ ) im Bogenmaß

$a_e$  := große Halbachse des Ellipsoides in Meter

$b_e$  := kleine Halbachse des Ellipsoides in Meter

$e$  := 1. numerische Exzentrizität

$$\rho := \text{Umrechnungskonstante} \left( \frac{180^\circ}{\pi} \right)$$

<b>Messgebiet</b>	<b>Lat</b> c	<b>Lon</b> c	<b>GK-Rechts</b> m	<b>GK-Hoch</b> m	<b>Meridiankonvergenz</b> c
Lister Tief	55.0485	8.4724	3 466347.7	6102319.5	-0.43
westlich von Helgoland	54.1959	7.5924	3 408202.8	6008193.6	-1.14
südlich von Helgoland	53.9785	8.1112	3 441757.3	5983448.9	-0.72
Elbmündung	53.8631	8.7099	3 480987.4	5970272.7	-0.23

Tabelle 4.2: Meridiankonvergenzen für alle wichtigsten Messgebiete

Damit ergab sich für der Richtungswinkel für die Offsetkorrektur:

$$t_R = A - c + \delta \quad (4.4)$$

wobei:

$t_R$  := Richtungswinkel zwischen GPS-Masterantenne und dem ADCP,  
bezogen auf Gitternord

$A$  := Richtung aus dem GPS-Kompass (Heading)

$c_g$  := ebene Gaußsche Meridiankonvergenz

$\delta$  := Richtungsoffset berechnet aus den orthogonalen Offsets in den Positionen  
zwischen GPS-Masterantenne und ADCP-Aufbauorten

Je größer die Entfernung zwischen dem ADCP und der GPS-Masterantenne, umso größer wirkt sich die Korrektur der ADCP-Position, bezogen auf die Meridiankonvergenz, aus. Auf dem Forschungsschiff Heincke westlich vor Helgoland beträgt der Anteil der Meridiankonvergenz bis 0,36 m.

#### 4.5 Beseitigung defekter Headings und Kurvenfahrten

Bei Aussetzern und Problemen des GPS-Gyros liefern die GPS-Geräte HDT-Strings keinen Wert (\$GPHDT,, T\*0D). Leider werden diese Informationslücken im Ensembleheader durch den Headingwert von 0.000 Grad aufgefüllt und dieser Kurs, obwohl es ein Dummy ist, erscheint auf dem Kontrollbildschirm als realer Kurs über Grund. Die Strömungswerte werden aber nicht um die Fahrt des Schiffes korrigiert und erreichen deswegen oft Beträge größer als 4,0 m/s. Solche Ensembles sind im Datensatz einfach zu finden, da einen Kurs gegen Nord auf dreitausendstel Grad genau zu fahren mit einem Messschiff im Gezeitengewässer unter Windeinfluss unwahrscheinlich ist. Die Informationen über die Rückstreuintensitäten der Partikel in der Wassersäule sind von diesen Aussetzern nicht betroffen, die Strömungswerte wurden jedoch verworfen.

Unwahrscheinlich ist auch ein Schiffskurs über mehrere Minuten, der auf 0,01 Grad konstant bleibt. Hierbei handelt es sich offensichtlich um einen Aufhänger, der zur fehlerhaften Strömungsbestimmung führt. Diese Messwerte wurden ebenfalls aus der Datenprozessierung ausgeschlossen.

Wie bereits im Abschnitt 4.1.3 gezeigt, führen Kursänderungen des Schiffes in eng gefahrenen Kurven oder Wendemanövern zu einer Verfälschung der Strömungsmessung. Es hat sich herausgestellt, dass eine Kursänderung, die größer ist als 10° während der Dauer eines Ensembles, zu sichtbar fehlerhaften Strömungswerten führt. Solche Ensembles wurden aus der weiteren Prozessierung der Daten ebenfalls ausgeschlossen.

Alle Bereinigungs-schritte sind in der Subroutine *adcp\_clean.pro* implementiert, siehe Flussdiagramm in der Abbildung 20.

## 4.6 Weitere Datenfilterung

Bereits während der Messung wird die Qualität der empfangenen Echos analysiert. Die daraus resultierende Qualität und Zuverlässigkeit der Strömungsmessung kann über diverse Einstellungen in dem Konfigurationsmenü des Programms WinRiver zusätzlich gesteigert werden. Dies wird erreicht unter anderem durch die Verwendung von Schwellenwerten, die die Eliminierung von einigen Ausreißern oder Messungen mit unzureichender Echoqualität wegfallen. Aus der der Echoqualität der mehrfachen Pings per Ensemble, Korrelation der Messungen aus den vier Schwingern für dieselbe Zelle und aus dem Nichtüberschreiten des Schwellenwertes für *error velocity* ergibt sich die Angabe *percent-good*. Sie kann den Wert von 0% bei schlechter und 100% bei optimaler Qualität und das für jede einzelne Tiefenzelle im Ensemble annehmen. Weicht die Qualität der Echos von einander ab, so werden Pings mit schlechter Qualität von der Ensemblemittelung ausgeschlossen. Wird aber nur ein Ping per Ensemble gesendet, so beträgt die Angabe „percent-good“ entweder 100% oder 0%, da keine Vergleichsmessung möglich ist (RDI 2003). An dieser Stelle sollte sich der ADCP-Nutzer nicht alleine auf diese, unter Umständen fehlleitende Angabe, verlassen.

Die bodennahe Strömung ist möglicherweise durch den Effekt der Nebenkeulen verfälscht, siehe Abschnitt 2.9. Aufgrund der verwendeten Geräte (20° Schwingersystem) liegt dieser Bereich, in dem die Nebenkeulen erwartet werden, bei 6% der Wassertiefe vom Boden aus gesehen und ist durch eine Linie parallel zum detektierten Meeresboden in den Kontrollfenstern markiert. Bei genauerer Betrachtung einiger Profile fiel auf, dass 6% der Wassertiefe nicht immer als hinreichendes Kriterium angenommen werden kann und deswegen in der Weiterverarbeitung als optionale Variable in der Subroutine *adcp\_clean.pro* eingeführt wurde.

Das im Referenzenvergleich erwähnte Kriterium für die Änderung der Mittelwerte des Roll- und Stampfwinkels zweier aufeinanderfolgender Ensembles, wird hier ebenfalls als optionale Variable eingeführt, um die stark verfälschten Ensembles aus der Weiterverarbeitung auszuschließen. Nicht optional sondern automatisch werden diejenigen Ensembles eliminiert, bei denen ein oder mehrere Schwinger Tiefenwerte gemessen haben, die unterhalb der Schwingereintauchtiefe erscheinen. Beide Bereinigungs Schritte sind in der Subroutine *adcp\_clean.pro* enthalten.

In dieser Weiterverarbeitung, siehe Flussdiagramm in der Abbildung 20, sind alle hier erwähnten Qualitätskriterien als Variablen eingeführt und werden in Abhängigkeit vom Datensatz (verschiedene hydrodynamische Prozesse, Messgebiete und Störeinflüsse) mit anderen Schwellenwerten prozessiert. Diese Notwendigkeit zeigte sich vor allem in den Ergebnissen des Referenzvergleichs. Alle im Kapitel 4 unternommenen Schritte, Berechnungen sowie die neuen Erkenntnisse haben das Ziel gehabt, im nachfolgenden Kapitel eine Datenanalyse anhand ADCP-Daten mit bestmöglicher Qualität durchführen zu können.

## 5 Datenanalyse

In diesem Kapitel werden die aufbereiteten und qualitätsgesicherten ADCP-Daten hinsichtlich ihrer Eignung auf die Extrapolation zur Wasseroberfläche untersucht. Diese Extrapolation ist notwendig um das radarbasierte Strömungsmesssystem RDCP, das sich zurzeit in der Entwicklung befindet, zu kalibrieren und die gemessenen Strömungsmessungen mit dem Überhorizont radar (HF-Radar) zu validieren. Diese Validation und die Kalibrierung werden nicht innerhalb dieser Ausarbeitung behandelt, sondern die Qualität und die Zuverlässigkeit der extrapolierten Strömungswerte, die als „Soll-Werte“ in einer Kalibrierung oder Validierung benutzt werden, exemplarisch untersucht.

Für die Entwicklung des Radar Doppler Current Profilers (RDCP) muss der Einfluss des Windes auf die Dopplerverschiebung der Radarwelle bei der Rückstreuung an der rauen Wasseroberfläche untersucht werden. Die Abhängigkeit von der Radarblickrichtung zum Wind und dem Winkel zwischen Radarstrahl und der Wasseroberfläche ( $\sim$ Entfernung) auf die Strömung der Grenzschicht Luft-Wasser muss noch untersucht werden. Für diese Kalibrierungsmessung stoppte das Messschiff am Ende der Längsprofile auf und die Radarantenne scannte alle  $20^\circ$  die Wasseroberfläche für ca. 4 Sekunden ab, siehe Abbildung G1 im Anhang. Die gemessenen radialen Strömungswerte aus der Radarmessung wurden um die Schiffsdrift und die Meeresströmung, gemessen mit dem ADCP direkt unter dem Schiffsboden, korrigiert. In dieser Arbeit wird die Windkalibrierung um die Analyse des Strömungsfeldes hinsichtlich der Homogenität im Scanbereich des Radars erweitert. Hierzu werden die ADCP-Daten aus den Längsprofilen genutzt, um durch eine anschließende Extrapolation zur Wasseroberfläche die Ergebnisse der Windkalibrierung zu verbessern. Dieser Scanbereich beträgt maximal eine Seemeile (Radius) und hat die radiale Zellenauflösung von 7,5 m.

Die Extrapolation der ADCP-Strömungswerte zur Wasseroberfläche ist aufgrund der ADCP-Einbautiefe von 1,7 m bis 4,0 m notwendig, da das RDCP die Strömung direkt an der Wasseroberfläche misst und das HF-Radar die mittlere Strömung in den obersten 2 m ermittelt. Über eine Parametrisierung der vermessenen Bereiche der Wassersäule (unterhalb des ADCP-Schwingerkopfes bis zum Meeresboden) wird vertikal zur Wasseroberfläche extrapoliert.

Die Qualität der Approximation in Abhängigkeit von den Strömungsverhältnissen sowie die Kriterien für die Wahl einer Parametrisierungsfunktion, werden exemplarisch (als Test der Implementierung) anhand von zwei typischen Vertikalprofilen aus den ADCP-Schlauchbootdaten (Messbereich 0,5 m unterhalb der Wasseroberfläche bis zum Meeresboden) ermittelt. Durch das Ausblenden der oberen Wasserschicht (entsprechend der Einbautiefe) aus dem Schlauchbootdatensatz, der Parametrisierung der verbleibenden Strömungswerte bis zum Meeresboden sowie anschließender Extrapolation zur Wasseroberfläche, werden die extrapolierten Strömungswerte anhand der zunächst ausgeblendeten Messungen validiert. Eine Untersuchung ob die Parametrisierung über die gesamte Wassersäule notwendig ist oder der obere Teil der Wassersäule für die Extrapolation genügt, wird ebenfalls diskutiert. Die

Implementierung von weiteren Parametrisierungsmethoden (z.B. über die Bestimmung der Hauptströmungsrichtungen oder die Verwendung lokaler Koordinatensysteme) wird aus Zeitgründen außerhalb dieser Arbeit erfolgen.

Für die Kalibrierung des RDCP ist es nicht hinreichend die Richtung und den horizontalen Betrag der Oberflächenströmung (abgeschätzt aus der Extrapolation) zu kennen sondern für die Zuverlässigkeit dieser Kalibrierung muss die Strömung im Scanbereich des Radars stationär bezüglich der Messzeit (ca. 10 Minuten) und räumlich (Radius bis max. 1852 m) homogen sein.

Da das Schlauchboot nur einmalig im Jahr 2007 eingesetzt worden ist, gilt es in diesem Kapitels folgende Fragen zu klären:

**Frage 2:** Welche Form der Parametrisierung der Strömung in der Wassersäule ist geeigneter im Bezug auf die Extrapolation zur Wasseroberfläche in Gebiet Lister Tief?

und folgend aus der Antwort:

**Frage 5:** Ist es zulässig ein unvollständiges Vertikalprofil zu parametrisieren und anschließend bis zur Wasseroberfläche zu extrapolieren?

## 5.1 Homogenität und Stationarität

Homogenität bedeutet im Bezug auf die Strömung innerhalb der Reichweite des Radars, dass keine Gradienten im horizontalen Betrag und in der Richtung auftreten dürfen. Ist dies nicht der Fall, muss abgeschätzt werden, in wie weit sich diese Inhomogenität auf die Kalibrierungsmessung auswirkt und damit auf die Zuverlässigkeit der Strömungsmessung mit dem RDCP. Da die Flut- und Ebbphase ca. 6 Stunden dauern und die Kalibrierungsmessung ca. 10 Minuten, kann selbst in einem nicht homogenen Gebiet von einer Stationarität bezüglich der Zeit ausgegangen werden.

Das im Kapitel 4 mehrfach diskutierte Profil 178 vom 2007.05.23 aus dem Messgebiet Lister Tief, siehe Abbildung 3.4, ist über GPS-VTG referenziert worden und wird hier exemplarisch für die Untersuchung der Homogenität herangezogen. Die letzten 500 m dieses Profils (Ensemblenummern von 6230 bis 6399) entsprechen dem Scanbereich des Radars im Anschluss (ab Ensemble 6400) an dieses Längsprofil. Die ADCP-Messwerte sind mit den Kriterien *error velocity* < 0,3 m/s und *percent good* von mindestens 60%, Roll- und Stampfwinkeldifferenz zweier aufeinanderfolgender Ensembles < 3° gefiltert worden, um die Analysen anhand zuverlässiger Daten machen zu können. Die erste Untersuchung der horizontalen Geschwindigkeitsbeträge dieses Profilausschnitts in der obersten Tiefe von 2,5 m ergab nicht nur eine Streuung der Messwerte (horizontaler Betrag und Richtung) sondern zeigte auch einen Trend.

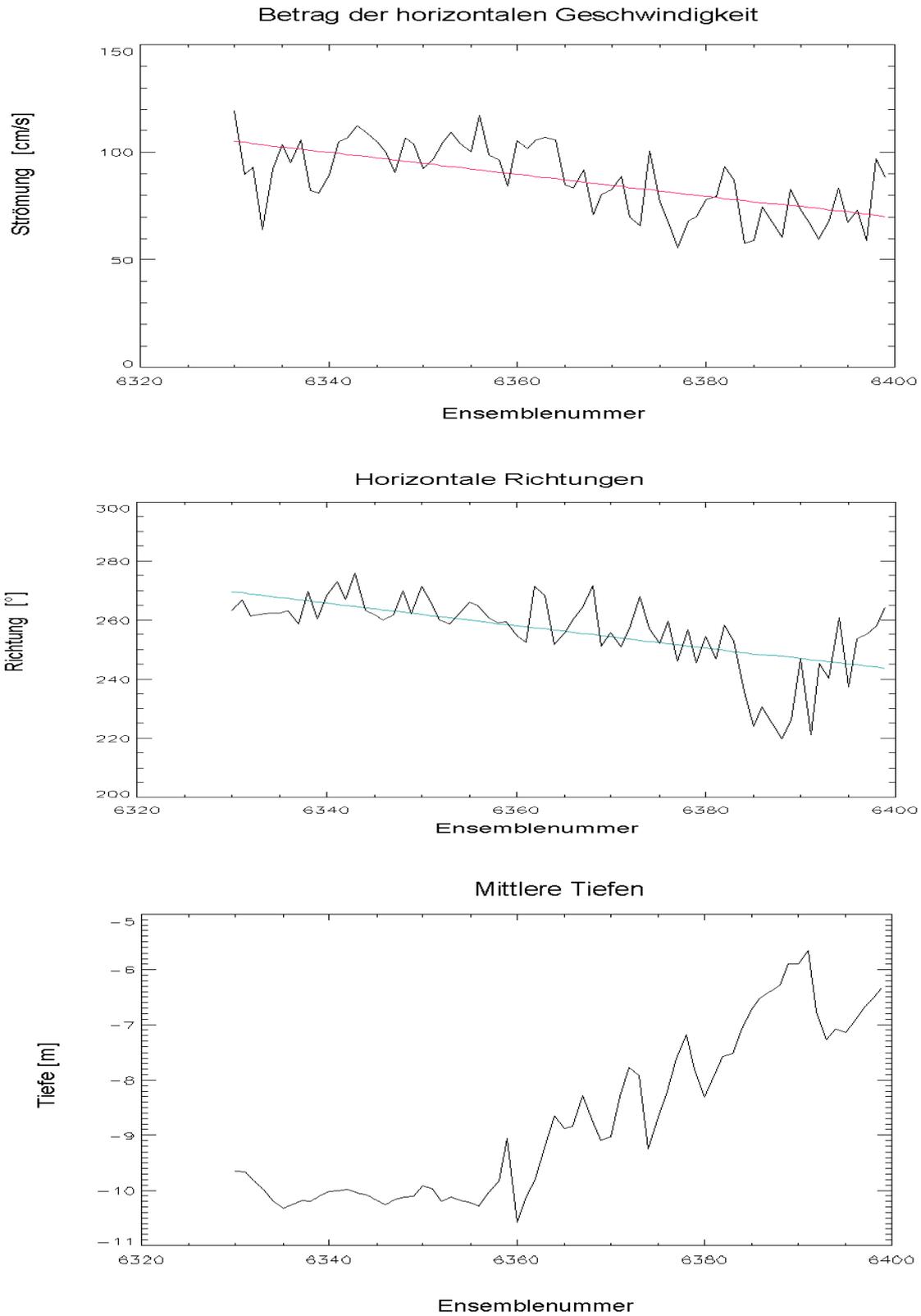


Abb. 5.1: Horizontale Beträge und Richtungen aus der Strömungsmessung in der Tiefe 2,5 m sowie die mittlere Wassertiefe am Ende des Profils 178 vom 2007.05.23 im Lister Tief. Dieser Profilausschnitt hat eine Länge von 500 m und liegt im Scanbereich des Radars während einer Windkalibrierung.

Die Mittelung der horizontalen Strömung ergab 0,87 m/s und eine Standardabweichung von 0,16 m/s. Die Differenz zwischen dem minimalen und dem maximalen Betrag in dieser Schicht liegt bei 0,64 m/s und die Steigung der ausgleichenden Geraden bei -0,51 cm/s/Ensemble, siehe Abbildung 5.1. Die Differenz der Richtungen beträgt  $56^\circ$  und zeigt ebenfalls ein Trend in der Steigung von -0,38 cm/s/Ensemble.

Daraus folgt die Antwort auf folgende Frage:

**Frage 3:** Ist das Teilgebiet, in dem die Radarkalibrierungsmessung durchgeführt wurde, homogen bezüglich der Strömung?

Aufgrund der Variation in dem Strömungsfeld folgt die Schlussfolgerung, dass die letzten 500 m des Profils 178 in einem nicht homogenen Gebiet genommen worden sind. Die maximalen Differenzen des Betrages (0,64 m/s) und der Richtung ( $56^\circ$ ) sowie der Trend sowohl in dem horizontalen Betrag als auch in der Richtung sind zu groß, um für die Kalibrierung des Windeinflusses auf die Radarmessung verwendet werden zu können. Diese Kriterien sind aber nicht global gültig und auch nicht hinreichend. Im Fall einer Homogenität (Steigung der ausgleichenden Geraden  $< 0,1$  cm/s/Ensemble und maximaler Betragsdifferenz von  $\pm 0,15$  m/s) in der Tiefe von 2,3 m kann es aufgrund von Gradienten in der Bathymetrie, die die Strömung vertikal beeinflussen, zur unterschiedlichen Strömungswerten an der Wasseroberfläche führen. Mehr dazu im nächsten Abschnitt.

## 5.2 Parametrisierung der Datensätze

Die fehlenden Strömungswerte (Betrag und Richtung) im oberen Bereich der Wassersäule, die aus der Montage des ADCP im Schiffsboden resultieren, werden mittels einer Extrapolation zur Wasseroberfläche überbrückt. Anhand der Schlauchbootmessung im Lister Tief (s. Abbildung 5.2), die den Messbereich 0,5 m unterhalb der Wasseroberfläche bis zum Meeresboden abdeckt, wurden verschiedene Schwingereinbautiefen simuliert und nach den besten Parametrisierungsalgorithmen gesucht. Das Vorgehen ist wie folgt:

- Ausblenden der Messwerte im oberen Bereich der Wassersäule (Schwingereintauchtiefen 1,7 m oder 4,0 m plus 0,5 m Totbereich)
- verschiedene Approximationen über die (Rest-) Wassersäule
- Extrapolation zur Wasseroberfläche
- Validierung der extrapolierten Strömungswerte durch Vergleich mit den ausgeblendeten Messwerten

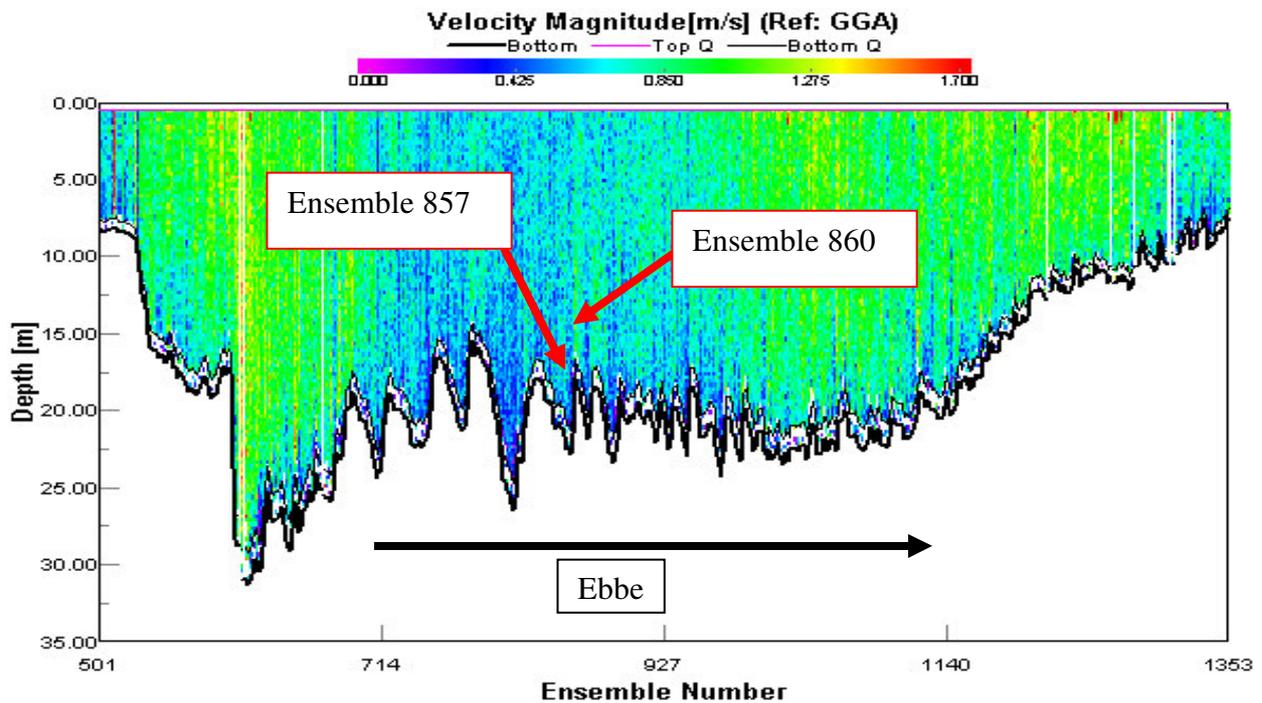


Abb. 5.2: Testdatensatz für die Suche nach der besten Parametrisierung und Validation der extrapolierten Strömungswerte. Schlauchbootmessung im Lister Tief vom 22.05.2007 mit der Profilnummer 003 während der Ebbsphase. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

Der ADCP-Hersteller RDI bietet in der Software WinRiver drei verschiedene Methoden um die fehlenden Messungen aus den nicht messbaren Bereichen, die oben durch die Schwingereinbautiefe und unten am Meeresboden durch die Nebenkeulen verursacht sind, zu ergänzen. Das Ziel dieser Berechnungen, die ebenfalls über Extrapolationen realisiert werden, ist es, den Durchflusswert für den gesamten Flussquerschnitt zu bestimmen. Da der Durchfluss als Produkt der Fläche (ADCP-Zelle) und der Strömungsstärke senkrecht zu dieser Fläche (Mueller & Wagner 2009) definiert ist, muss die Strömung über Extrapolationen abgeschätzt werden. Leider ist die Ausgabe der extrapolierten Strömungswerte (Richtung und Betrag) bei WinRiver nicht möglich, sodass die von RDI verwendeten Methoden nur prinzipiell vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für die Implementierung mit eigenem Softwareprototyp geprüft werden.

Die erste Methode basiert auf der Annahme, dass der Messwert in der obersten Messzelle bis zur Wasseroberfläche konstant ist, daher auch der Name „constant method“. Mit dieser Konstanzannahme wird auch der untere Bereich der Wassersäule berechnet und zwar mit dem Messwert aus der untersten Tiefenzelle. Diese Annahme widerspricht allen hydrodynamischen Regeln (RDI 2003) und liefert oft unplausible Werte. Die zweite Methode nutzt die Messwerte der obersten drei Messzellen um eine lineare Regression zu bestimmen und anschließend an die Wasseroberfläche zu extrapolieren. Die Abbildung 5.3 demonstriert, dass auch diese Methode nicht universell eingesetzt werden kann (grüner Strich).

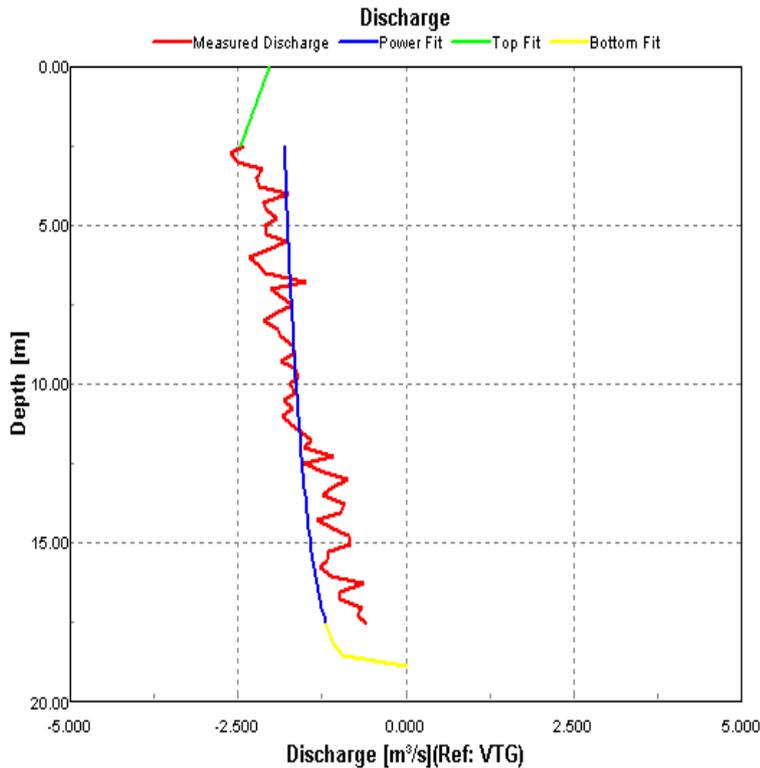


Abb. 5.3: Extrapolationsmethoden der Software WinRiver angewandt auf den Datensatz aus dem Lister Tief Profil 178 vom 2007.05.23 Ensemble Nummer 5849. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

Die dritte und letzte Berechnungsmethode im WinRiver basiert auf der Potenzfunktion genannt „Power Law“ nach (Chen 1991), bei der die Abnahme des horizontalen Strömungsbeitrages aufgrund der Bodenreibung in der Bodennahenschicht berücksichtigt wird. Dies wird erzielt über die Approximation an die Messdaten folgender Funktion (RDI 2003):

$$u = a' * z_b^b \quad (5.1)$$

wobei:

$u$  := Betrag der Strömung

$a'$  := Unbekannte

$z_b$  := Tiefe in Metern vom Boden aus

$b$  := mit dem festen Wert für den Exponenten 1/6

Durch die Bestimmung des Parameters  $a'$  ist es möglich zur Wasseroberfläche bzw. zum Meeresboden zu extrapolieren, siehe blaue Linie Abbildung 5.3.

Aufgrund der Tatsache, dass die Methode nach (Chen 1991) über eine Approximation an die Messwerte der gesamten Wassersäule eine zuverlässigere Extrapolation verspricht, wurde sie als einzige in den Softwareprototyp implementiert. Zusätzlich zu dieser Methode wurden folgende mathematische Funktionen angewandt:

- Polynom ersten Grades:  $y = az + d$
- Polynom zweiten Grades:  $y = az + bz^2 + d$
- Polynom dritten Grades  $y = az + bz^2 + cz^3 + d$
- Logarithmus  $y = a \cdot \log(z_b) + d$

Wobei den Messparametern  $y$  (=Strömungskomponenten),  $z$  (=Tiefe von der Wasseroberfläche) und  $z_b$  (=Tiefe vom Meeresboden aus) die Fitparameter  $a, b, c$  und  $d$  gegenüberstanden.

In der Literatur werden die logarithmischen und die Potenzfunktionen nur an den Betrag der Hauptströmungsrichtung approximiert, siehe Abbildung 5.4. Da die Hauptströmungsrichtung in dem Gezeitenkanal Lister Tief in dem ausgesuchten Bereich die Ost-West Ausrichtung annimmt, können diese Funktionen auch auf die Strömungskomponenten angewandt werden. Für zukünftige Weiterentwicklung sind Verwendung von lokalen Koordinatensystemen (ensembleweise) und eine hauptströmungsorientierte Analyse vorgesehen.

Nach dem Ausblenden der Messung im oberen Teil der Wassersäule wurden die übrigen Messwerte zunächst mit den Kriterien *error velocity*  $< 0,3$  m/s und *percent good* von mindestens 60%, Roll und Stampfwinkeldifferenzen zweier aufeinanderfolgender Ensembles  $< 3^\circ$  gefiltert, um anschließend vertikal in den Strömungskomponenten Ost-West und Nord-Süd getrennt voneinander für jedes Ensemble approximiert zu werden. Die Güte der Approximation wurde über die Korrelation der Mess- und der Funktionswerte, den Mittelwert und die Standardabweichung aus den Differenzen zwischen den approximierten Kurven und den Messwerten bestimmt. Im weiteren Schritt wurden diese Differenzen analysiert und 10% der Messwerte mit den größten Differenzen zu der approximierten Kurve als Ausreißer verworfen (Robust Fitting), um eine erneute Approximation zu berechnen. Mit den neu bestimmten Koeffizienten wurde dann bis zur Wasseroberfläche extrapoliert. Ein Vergleich der anfangs ausgeblendeten Messwerte mit den extrapolierten Werten, zeigte welche Parametrisierung bei welchen Strömungsverhältnissen besser geeignet ist.

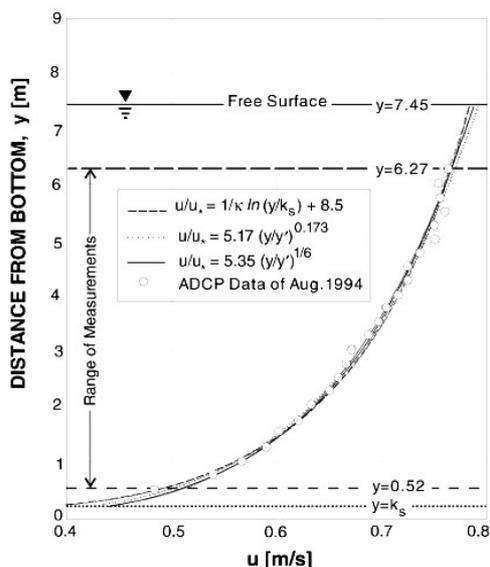


Abb. 5.4: Parametrisierungen eines Strömungsprofils (20 minutige Mittelung) erhoben mit einem am Gewässerboden montierten ADCP. (González 1996)

Aus dem Schlauchbootdatensatz wurden zwei typische Ensembles exemplarisch ausgesucht. Das erste Ensemble mit der Nummer 857 zwischen zwei Sanddünen und das zweite Ensemble 860 direkt auf dem Dünenkamm, siehe Abbildung 5.5. Beide Ensembles liegen ca. 20 m bzw. 9 Sekunden auseinander. Beim direkten Vergleich der horizontalen Beträge der Strömung beider vertikaler Profile fällt die Zunahme der Geschwindigkeit direkt über dem Dünenkamm, die den horizontalen Betrag an der Wasseroberfläche übersteigt. Der maximale horizontale Betrag der Strömung wird im Ensemble 860 vor der Sanddüne in der Tiefe von ca. 10 m erreicht mit einem Trend zu Geschwindigkeitsabnahme in den oberen Wasserschichten. Vergleicht man die Abbildungen 5.4 und 5.6 so erkennt man sofort, dass die Strömungsverhältnisse im Lister Tief nicht unbedingt den aus der Literatur bekannten logarithmischen oder potenziellen Verlauf über die Wassersäule entsprechen.

Im ersten Schritt wurden aus der Strömungsmessung die ersten 2,3 m von der Wasseroberfläche ausgeblendet (entspricht der nicht messbaren Schicht bei dem ADCP-Einsatz auf dem Forschungsschiff L.Prandtl) sowie die Messwerte, die sich in der Tiefe unterhalb von 6 % der Gesamtwassertiefe vom Meeresboden aus befanden. Beim Ensemble 857 machte es 1,9 m aus und beim Ensemble 860 1,7 m. Anschließend wurden alle fünf Approximationsmethoden auf die übriggebliebenen Messwerte angewandt. Das Ergebnis der Parametrisierung und der Extrapolation ist in der Abbildung 5.6 visualisiert und in der Tabelle 5.1 mit Korrelationen, Mittelwerten und Standardabweichungen aus den Differenzen zwischen den approximierten Kurven und den Messwerten nach dem robusten Fitting belegt.

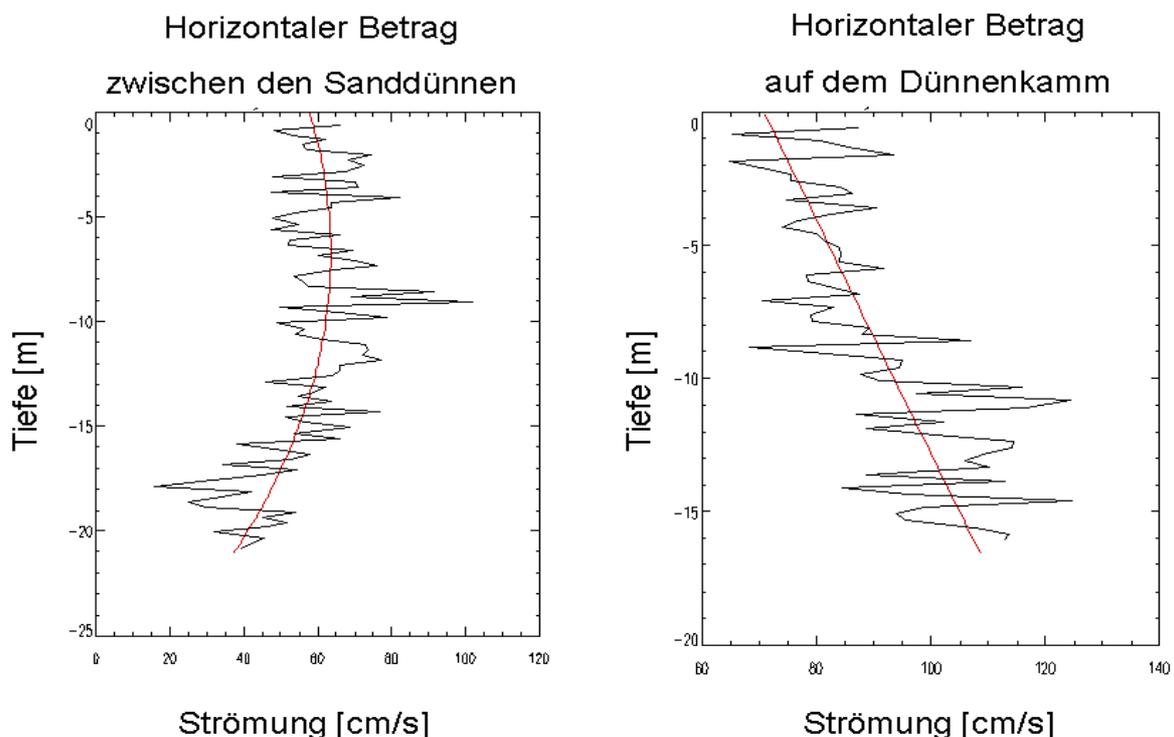


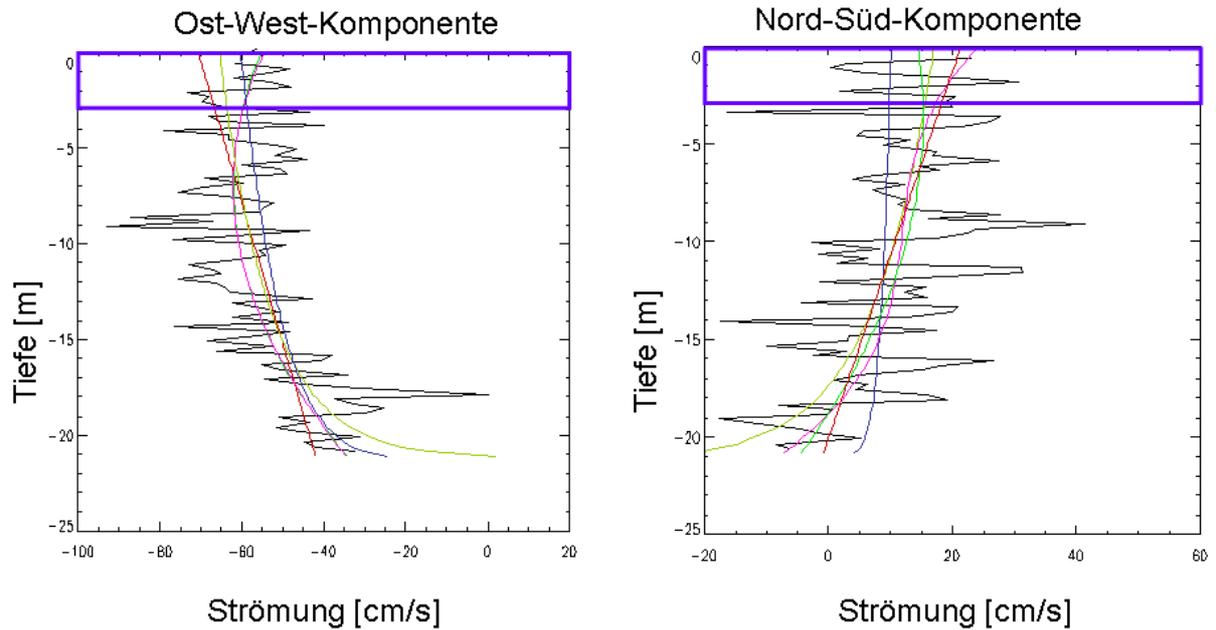
Abb. 5.5: Vergleich der horizontalen Beträge zweier Vertikalprofile aus dem Messgebiet Lister Tief, die 20 m bzw. 9 Sekunden auseinander liegen. Abbildung links zwischen zwei Sanddünen (Ensemblenummer 857), rechts auf dem Dünenkamm (Ensemblenummer 860).

Bei der Ost-West-Komponente des Ensembles 857 zwischen den Sanddünen fällt bereits optisch auf, dass das Polynom 2-ter Ordnung (grün) an das Vertikalprofil am besten approximiert, welches sich in der kleinsten Standardabweichung (7,6 cm/s) und der besten Korrelation (0,672) der 68 Messwerte widerspiegelt, siehe Tabelle 5.1. Der Vergleich der extrapolierten und der gemessenen sieben Werte ergab einen Mittelwert von -0,6 cm/s und eine Standardabweichung von 9 cm/s. Auch die Messwerte der Nord-Süd-Komponente wurden mit dem Polynom 2-ter Ordnung und des logarithmischen Fits gut approximiert, denn die Standardabweichung liegt in beiden Fällen um 7,1 cm/s und der Korrelationskoeffizient bei 0,604. Die Gegenüberstellung der extrapolierten und der Messwerte ergab, dass die Polynomfunktion 2-ter Ordnung etwas bessere Ergebnisse liefert: Mittelwert 1,6 cm/s und eine Standardabweichung von 11,1 cm/s anstatt 3,0 cm/s im Mittelwert und die Standardabweichung von 11,2 cm/s beim Logarithmus.

Beim zweiten Ensemble 860, das sich direkt über dem Dünenkamm befindet, nimmt der Betrag der Strömung zum Boden hin zu. Die Ergebnisse der Approximation und der Validation der extrapolierten Strömungswerte weisen bei dem Power Fit die größten Abweichungen zwischen Approximation und den Messwerten auf. Die kubische Funktion dagegen passt sich nicht nur optisch sehr gut an die Messwerte an, sondern sie liefert auch die kleinste Standardabweichung von 6,2 cm/s. Die Validation der Extrapolation kann mit dem Mittelwert von -3,7 cm/s und der Standardabweichung von 6,7 cm/s als „gut“ bewertet werden. Diese kubische Funktion liefert für die Nord-Süd-Komponente ebenfalls das beste Ergebnis der Extrapolation und zwar einen Mittelwert von 1,9 cm/s und eine Standardabweichung von 13,8 cm/s.

Vergrößert man die Extrapolationstiefe auf z.B. 5,0 m, die in der Summe der Schwingereintauchtiefe und dem Totbereich bei der ADCP-Installation auf dem Forschungsschiff Heincke entspricht, verringert sich gleichzeitig die Anzahl der Messwerte über die approximiert wird. Im Beispiel zuvor war das Verhältnis beim Ensemble 857: Messwerte aus ca. 20 m Wassersäule und Extrapolation über 2,3 m. Bei 5,0 m Extrapolationstiefe stehen Messwerte nur noch aus ca. 17 m Wassersäule zur Verfügung und beim Dünenkamm Ensemble 860 lediglich aus 12 m Wassersäule. Die Auswirkung dieser Reduktion ist in der Abbildung 5.7 zu sehen.

Ensemblenr. 857 zwischen den Sanddünen



Ensemblenr. 860 auf dem Dünnenkamm

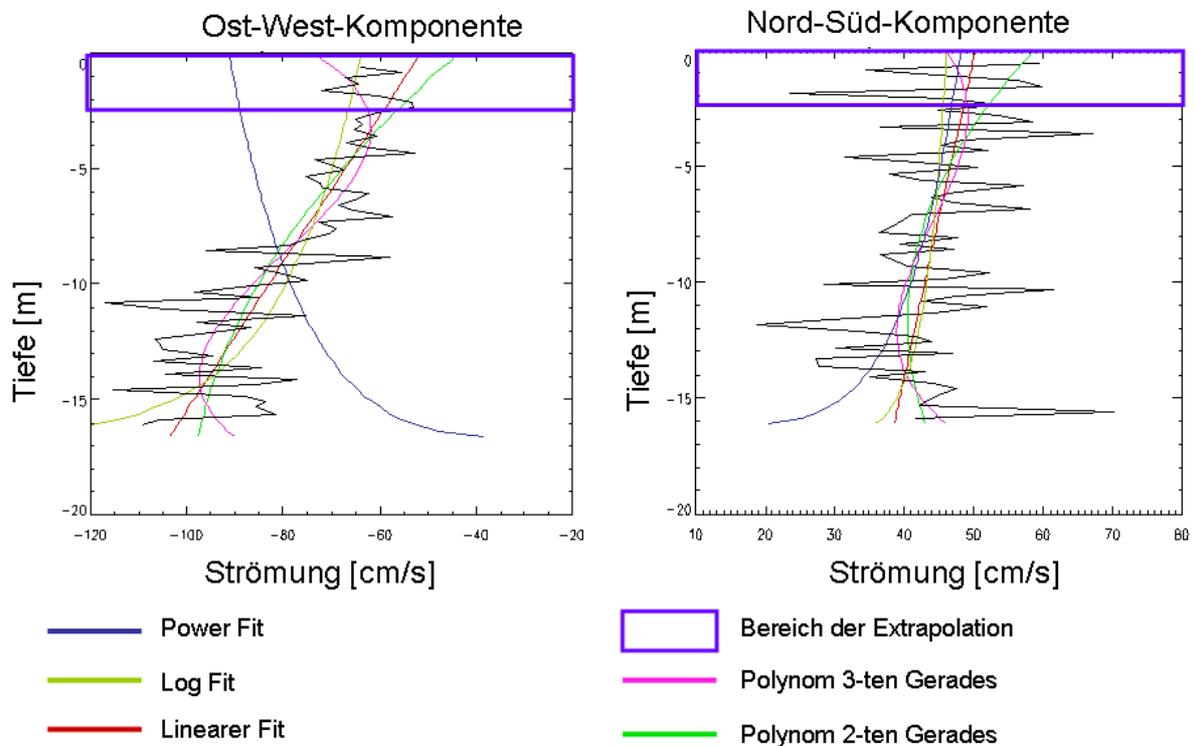


Abb. 5.6: Ergebnisvergleich der Parametrisierungen der Strömungskomponenten Ost-West und Nord-Süd zweier Vertikalprofile aus dem Messgebiet Lister Tief mit ausgeblendetem oberen 2,3 m. Abbildungen oben zeigen das Profil zwischen zwei Sanddünen (Ensemblennummer 857), unten auf dem Dünenkamm (Ensemblennummer 860).

<b>Ensemblenummer 857 (vor der Sanddüne) OST-WEST-Komponente</b>							
<i>Differenzen aus der Wassersäule (Fit - Messwert)</i>				<i>Differenzen aus der Extrapolation</i>			
Funktionsterm / Ergebnisse	Korrelation	Mittel in [cm/s]	Stdabw. in [cm/s]	Layeranzahl	Mittel in [cm/s]	Stdabw. in [cm/s]	Layeranzahl
$y=a*z+d$	0.618	10.550	8.827	68	-11.74	9.39	7
$y=a*z+b*z^2+d$	0.672	10.102	7.590	68	-0.59	8.97	7
$y=a*z+b*z^2+c*z^3+d$	0.672	10.133	7.591	68	-0.17	8.96	7
$y=a*\log(zb)+d$	0.658	9.952	8.235	68	-7.59	9.26	7
$y=a*(zb)^{(1/6)}$	0.606	10.685	8.401	68	-2.56	9.24	7

<b>Ensemblenummer 857 (vor der Sanddüne) NORD-SÜD-Komponente</b>							
<i>Differenzen aus der Wassersäule (Fit - Messwert)</i>				<i>Differenzen aus der Extrapolation</i>			
Funktionsterm / Ergebnisse	Korrelation	Mittel in [cm/s]	Stdabw. in [cm/s]	Layeranzahl	Mittel in [cm/s]	Stdabw. in [cm/s]	Layeranzahl
$y=a*z+d$	0.569	8.715	7.597	68	6.64	11.32	7
$y=a*z+b*z^2+d$	0.594	8.856	7.080	68	1.58	11.11	7
$y=a*z+b*z^2+c*z^3+d$	0.608	8.762	7.286	68	7.35	11.57	7
$y=a*\log(zb)+d$	0.604	8.699	7.103	68	3.05	11.23	7
$y=a*(zb)^{(1/6)}$	0.436	9.439	6.922	68	-3.35	11.16	7

<b>Ensemblenummer 860 (auf der Kante der Sanddüne) OST-WEST-Komponente</b>							
<i>Differenzen aus der Wassersäule (Fit - Messwert)</i>				<i>Differenzen aus der Extrapolation</i>			
Funktionsterm / Ergebnisse	Korrelation	Mittel in [cm/s]	Stdabw. in [cm/s]	Layeranzahl	Mittel in [cm/s]	Stdabw. in [cm/s]	Layeranzahl
$y=a*z+d$	0.836	8.026	6.615	50	6.65	7.11	7
$y=a*z+b*z^2+d$	0.836	8.249	6.284	50	11.56	7.60	7
$y=a*z+b*z^2+c*z^3+d$	0.866	7.486	6.226	50	-3.70	6.70	7
$y=a*\log(zb)+d$	0.787	8.994	7.834	50	-2.92	6.72	7
$y=a*(zb)^{(1/6)}$	-0.682	19.824	10.463	50	-27.60	6.48	7

<b>Ensemblenummer 860 (auf der Kante der Sanddüne) NORD-SÜD-Komponente</b>							
<i>Differenzen aus der Wassersäule (Fit - Messwert)</i>				<i>Differenzen aus der Extrapolation</i>			
Funktionsterm / Ergebnisse	Korrelation	Mittel in [cm/s]	Stdabw. in [cm/s]	Layeranzahl	Mittel in [cm/s]	Stdabw. in [cm/s]	Layeranzahl
$y=a*z+d$	0.398	7.091	4.996	50	3.01	13.55	7
$y=a*z+b*z^2+d$	0.435	6.767	5.484	50	8.54	13.32	7
$y=a*z+b*z^2+c*z^3+d$	0.474	6.920	5.286	50	1.91	13.83	7
$y=a*\log(zb)+d$	0.292	7.074	5.528	50	-0.45	13.62	7
$y=a*(zb)^{(1/6)}$	0.414	7.229	5.016	50	1.14	13.57	7

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Parametrisierungen der Wassersäule mit ausgeblendeten oberen 2,3 m

Die kubische Funktion approximiert die Messwerte immer noch am besten, was die kleinsten Standardabweichungen und beste Korrelationen beweisen, siehe Tabelle 5.2. Der Vergleich der zunächst ausgeblendeten Strömungswerte mit den extrapolierten Werten zeigt jedoch, dass diese Polynomfunktion die größten Abweichungen ergab, vergleiche Tabelle 5.2 und die Abbildung 5.7. Bei der Betrachtung der extrapolierten Kurven in der Abbildung 5.7, fällt auf, dass die lineare Approximation beim Ensemble 860 trotz der wenigen Messwerte, gute Ergebnisse beim Vergleich der extrapolierten und der Messwerte in den ersten 5,0 m unterhalb der Wasseroberfläche vorweisen kann.

<b>Ensemblenummer 857 (vor der Sanddüne) OST-WEST-Komponente</b>							
Funktions-term / Ergebnisse	Differenzen aus der Wassersäule (Fit - Messwert)				Differenzen aus der Extrapolation		
	Korrelation	Mittel in [cm/s]	Stdabw. in [cm/s]	Layernanzahl	Mittel in [cm/s]	Stdabw. in [cm/s]	Layernanzahl
$y=a^*z+d$	0.620	11.088	8.486	58	-10.41	11.32	18
$y=a^*z+b^*z^2+d$	0.682	9.371	7.525	58	11.07	11.92	18
$y=a^*z+b^*z^2+c^*z^3+d$	0.762	9.557	7.862	58	47.71	24.24	18
$y=a^*alog(zb)+d$	0.565	10.946	9.215	58	-3.37	10.94	18
$y=a^*(zb)^{1/6}$	0.504	10.921	9.217	58	3.36	10.92	18

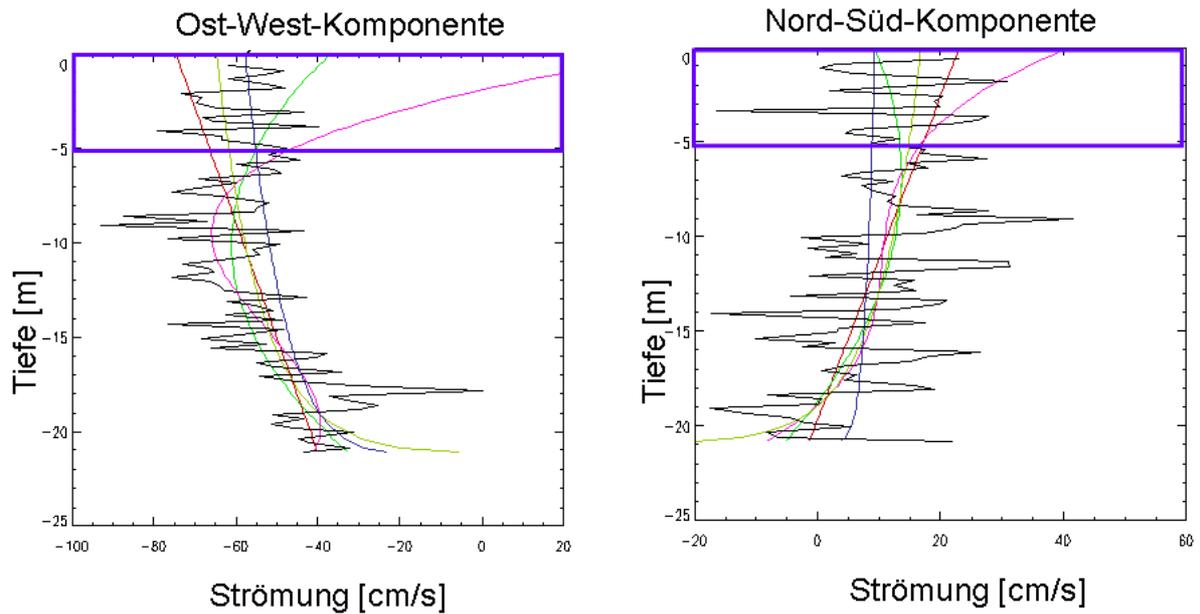
<b>Ensemblenummer 857 (vor der Sanddüne) NORD-SÜD-Komponente</b>							
Funktions-term / Ergebnisse	Differenzen aus der Wassersäule (Fit - Messwert)				Differenzen aus der Extrapolation		
	Korrelation	Mittel in [cm/s]	Stdabw. in [cm/s]	Layernanzahl	Mittel in [cm/s]	Stdabw. in [cm/s]	Layernanzahl
$y=a^*z+d$	0.554	8.611	7.011	58	6.72	12.17	18
$y=a^*z+b^*z^2+d$	0.584	8.528	6.805	58	-1.24	12.03	18
$y=a^*z+b^*z^2+c^*z^3+d$	0.603	8.421	6.964	58	12.57	13.68	18
$y=a^*alog(zb)+d$	0.421	8.991	6.809	58	2.67	12.05	18
$y=a^*(zb)^{1/6}$	0.402	9.371	7.115	58	-4.11	12.03	18

<b>Ensemblenummer 860 (auf der Kante der Sanddüne) OST-WEST-Komponente</b>							
Funktions-term / Ergebnisse	Differenzen aus der Wassersäule (Fit - Messwert)				Differenzen aus der Extrapolation		
	Korrelation	Mittel in [cm/s]	Stdabw. in [cm/s]	Layernanzahl	Mittel in [cm/s]	Stdabw. in [cm/s]	Layernanzahl
$y=a^*z+d$	0.746	9.338	7.131	40	2.76	6.89	18
$y=a^*z+b^*z^2+d$	0.756	9.393	6.235	40	18.60	11.80	18
$y=a^*z+b^*z^2+c^*z^3+d$	0.813	7.643	6.600	40	-29.42	20.97	18
$y=a^*alog(zb)+d$	0.700	11.627	10.629	40	-8.03	6.14	18
$y=a^*(zb)^{1/6}$	-0.513	16.333	9.674	40	-27.35	6.69	18

<b>Ensemblenummer 860 (auf der Kante der Sanddüne) NORD-SÜD-Komponente</b>							
Funktions-term / Ergebnisse	Differenzen aus der Wassersäule (Fit - Messwert)				Differenzen aus der Extrapolation		
	Korrelation	Mittel in [cm/s]	Stdabw. in [cm/s]	Layernanzahl	Mittel in [cm/s]	Stdabw. in [cm/s]	Layernanzahl
$y=a^*z+d$	0.262	6.737	5.067	40	-0.63	11.20	18
$y=a^*z+b^*z^2+d$	0.353	6.583	5.336	40	9.66	11.99	18
$y=a^*z+b^*z^2+c^*z^3+d$	0.416	6.766	4.766	40	-11.80	14.08	18
$y=a^*alog(zb)+d$	0.156	6.580	5.778	40	-4.20	11.24	18
$y=a^*(zb)^{1/6}$	0.237	6.894	4.803	40	-3.09	11.20	18

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Parametrisierungen der Wassersäule mit ausgeblendeten oberen 5,0 m

Ensemblenr. 857 zwischen den Sanddünen



Ensemblenr. 860 auf dem Dünnenkamm

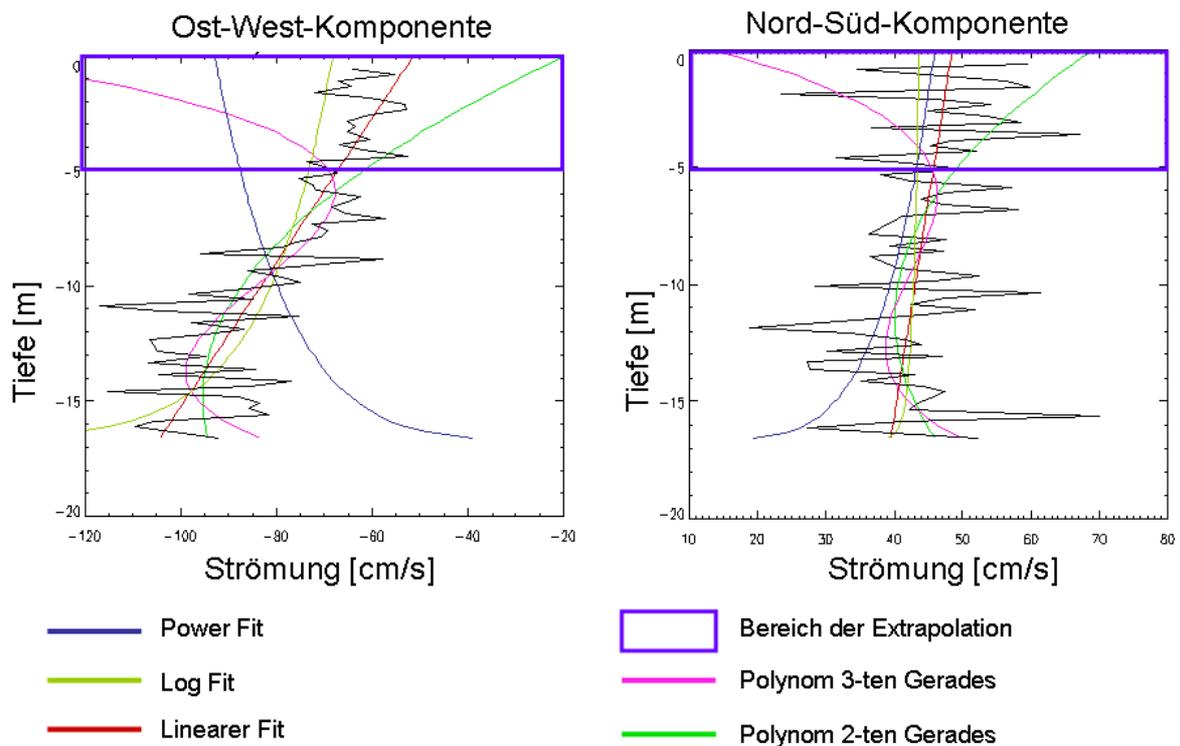


Abb. 5.7: Ergebnisvergleich der Parametrisierungen der Strömungskomponenten Ost-West und Nord-Süd zweier Vertikalprofile aus dem Messgebiet Lister Tief mit ausgeblendeten oberen 5,0 m. Abbildungen oben zeigen das Profil zwischen zwei Sanddünen (Ensemblennummer 857), unten auf dem Dünenkamm (Ensemblennummer 860).

Befindet sich die zu extrapolierende Schicht im linearen Anteil des Strömungsprofils (falls dieser überhaupt vorhanden ist), können die Strömungsverhältnisse mit der linearen Regression abgeschätzt werden. Ein Test mit dieser Annahme wurde anhand beider Ensembles 857 und 860 durchgeführt, indem über das Tiefenintervall von 15,0 m bis 5,0 m approximiert wurde, um anschließend über die Tiefenschicht 5,0 m bis zur Wasseroberfläche zu extrapolieren. Der Vergleich der Differenzen zwischen der Extrapolation und den Messwerten zeigt, dass die lineare Extrapolation nicht über den gesamten Messbereich deutliche Verbesserung z.B. beim Ensemble 857, das sich zwischen den Sanddünen befindet, bedeutet. Der Mittelwert dieser Differenzen liegt für die Ost-West-Komponente bei nur 3,5 cm/s und bei der Approximation über den gesamten Messbereich liegt er bei -10,4 cm/s, vergleiche Tabelle 5.2 und 5.3. Ähnlich verhält es sich bei der Verbesserung für die Nord-Süd-Komponente von 6,7 cm/s beim Approximieren über die gesamte Wassersäule auf nur 2,7 cm/s beim Tiefenintervall von 15,0 m bis 5,0 m. Die Standardabweichungen blieben fast unverändert, da sie die Streuung der Messung vom Schlauchboot aus wiedergeben.

Bei dem Ensemble über dem Dünenkamm erhöht diese Verkürzung der Approximationstiefe um 2 m die statistische Unsicherheit. Der Mittelwert der Differenzen zwischen den extrapolierten Werten und den Messwerten steigt von 6,7 cm/s auf 8,4 cm/s bei der Ost-Westkomponente und verbessert den Mittelwert in der Nord-Südkomponente unwesentlich von -0,6 cm/s auf -0,4 cm/s.

	<i>Differenzen aus der Wassersäule (Fit - Messwert)</i>				<i>Differenzen aus der Extrapolation</i>		
	Korrelation	Mittel in [cm/s]	Stdabw. in [cm/s]	Layeranzahl	Mittel in [cm/s]	Stdabw. in [cm/s]	Layeranzahl
Ensemble 857 Ost-West	0.174	8.731	7.492	36	3.55	10.73	18
Ensemble 857 Nord-Süd	0.199	8.045	6.528	36	2.70	12.07	18
Ensemble 860 Ost-West	0.812	7.528	6.556	35	8.40	7.52	18
Ensemble 860 Nord-Süd	0.304	7.009	4.981	35	-0.47	11.20	18

Tabelle 5.3: Ergebnisse der Validation der linearen Extrapolation über den Tiefenbereich 5 m bis zur Wasseroberfläche nach einer Approximation über den Tiefenbereich 15 m bis 5 m.

### 5.3 Fazit der Parametrisierung

Anhand dieser Ergebnisse kann eine weitere Frage aus dem Kapitel 3 beantwortet werden:

**Frage 2:** Welche Form der Parametrisierung der Strömung in der Wassersäule ist geeigneter im Bezug auf die Extrapolation zur Wasseroberfläche in Gebiet Lister Tief?

Die Antwort lautet: es kommt auf das Tiefenverhältnis der Approximation zu Extrapolation sowie auf die Strömungsverhältnisse im Messgebiet an. Beträgt die zu extrapolierende Tiefe ca. 10 bis 13 % der gesamten Wassertiefe, so kann anhand der kleinsten Standardabweichung und einer guten Korrelation eine Funktion bestimmt werden, mit der die fehlende Strömungsinformation aus der obersten Wasserschicht per Extrapolation abgeschätzt werden kann.

Dieses Kriterium der kleinsten Standardabweichung und einer hohen Korrelation gilt nicht, wenn die zu extrapolierende Schicht ca. 30 % der gesamten Wassersäule beträgt. In diesem Fall sollten weder die Polynomfunktionen noch die in der Literatur häufig verwendete logarithmische oder Potenzfunktionen verwendet werden, vergleiche Abbildung 5.7. Die Anwendung der linearen Gleichung nur auf den oberen Teil des Strömungsprofils darf auch nicht uneingeschränkt erfolgen, denn direkt über dem Dünenkamm erhöhte sich die statistische Unsicherheit. Das Kriterium der kleinsten Standardabweichung und einer guten Korrelation verliert an Bedeutung, wenn die Anzahl der Stützstellen nicht ausreichend ist z.B. beim Verhältnis der Approximations- zu Extrapolationstiefe von 2:1. Der Korrelationskoeffizient unterschreitet hier den Wert von 0,2 daher folgt die Schlussfolgerung für die zukünftigen Untersuchungen: es müssen weitere statistische Kriterien zusätzlich herangezogen werden, um zuverlässig extrapolieren zu können.

Die präsentierte Strömungssituation im Lister Tief ändert sich permanent und das Messschiff verändert zusätzlich die Position, was aufgrund der Inhomogenität im Messgebiet zu einer Veränderung der Form des Strömungsprofils führt. Die Abbildung 5.9 zeigt beispielhaft die horizontalen Beträge der Strömung, die in einem ähnlichen Gezeitenkanal wie dem Lister Tief mit einem stationären ADCP gemessen wurden, das vom Meeresboden aus zur Wasseroberfläche hin gerichtet war. Diese zeitliche Variabilität beweist, dass die Wahl der besten Approximation dynamisch sein muss, da das aus der Literatur bekannte logarithmische Profil weder zeitlich noch örtlich präsent sein muss. Betrachtet man den oberen Bereich der Strömungen in der Abbildung 5.9 zwischen 20 m und 30 m über dem Gewässerboden, erkennt man, dass der lineare Anteil der Strömung häufig auftritt.

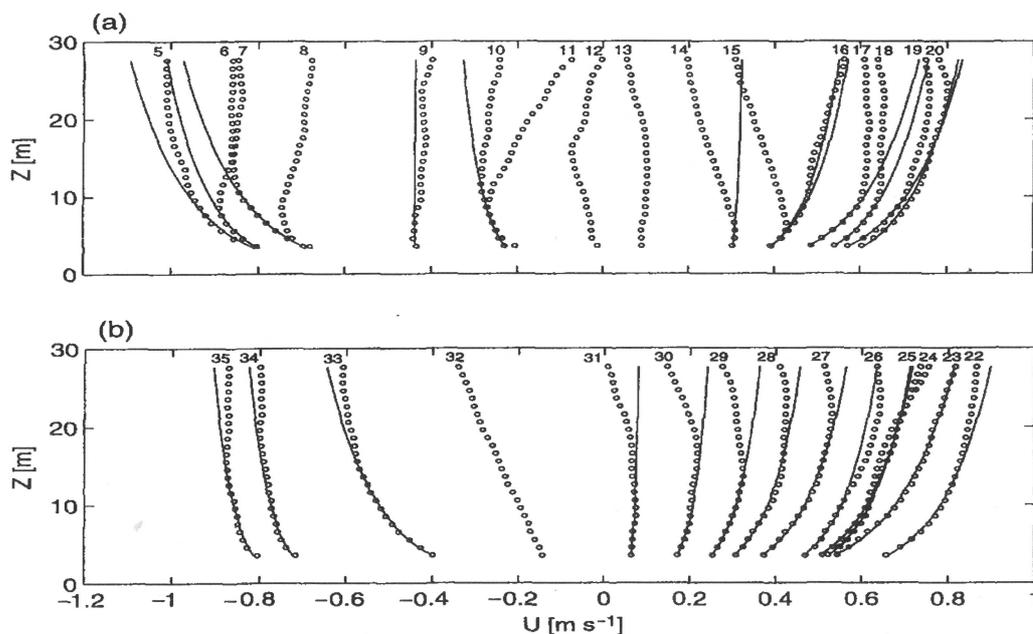


Abb. 5.8: Ergebnis einer logarithmischen Parametrisierung des Strömungsbetrages in der Hauptströmungsrichtung angewandt auf eine stationäre Messung in dem Gezeitenkanal Cordova bei Vancouver (Canada). Die Messungen repräsentieren einen Tidenzyklus, die Einzelmessungen wurden auf Ensembles a 20 Minuten gemittelt. (Lueck und Lu 1997).

Damit ergibt sich die Antwort auf die letzte Frage in dieser Ausarbeitung, die sich auf ein Beispiel aus dem Gebiet 2 der Nordsee westlich vor Helgoland bezieht. In diesem Ausschnitt tritt keine hydrodynamische Wechselwirkung der Gezeitenströmung und der Bathymetrie auf, jedoch begrenzten Schichtungen in dem unteren Teil der Wassersäule den Messbereich mit einem 1200kHz ADCP. Die Frage zu diesem Beispiel lautet:

**Frage 5:** Ist es zulässig ein unvollständiges Vertikalprofil zu parametrisieren und anschließend bis zur Wasseroberfläche zu extrapolieren?

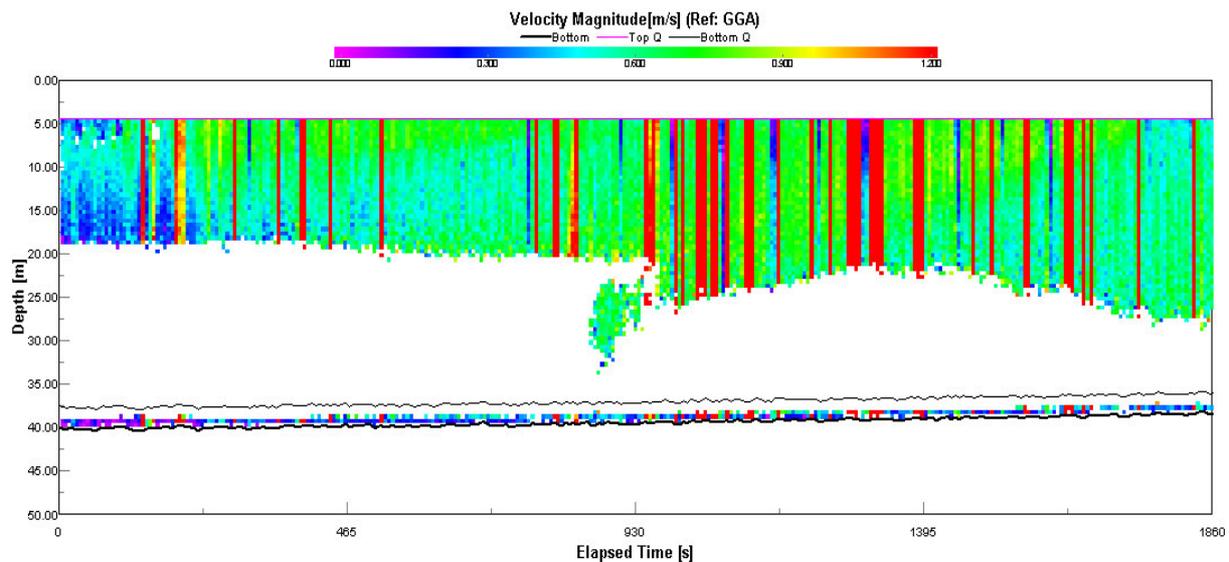


Abb. 5.9: Horizontaler Betrag der Strömung aus dem Profil 021 vom 09.09.2008 erhoben westlich vor Helgoland. Schichtungen in der Wassersäule verhinderten die schwachen Ultraschallwellen des 1200kHz ADCP die Messung der Strömung bis zum Meeresboden. Die Bodennahen Strömungswerte sind auf den Nebenkeuleneffekt zurückzuführen. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

Dadurch, dass die gemessenen Strömungswerte über der Schichtung die oberen 50% der Wassersäule ausmachen und das Verhältnis der Approximation zu der Extrapolation von 3:1 haben, könnte durch die Verwendung von z.B. der linearen Funktion die Strömung an der Wasseroberfläche abgeschätzt werden. Um die Zuverlässigkeit dieser Annahme zu prüfen, müssten Messungen vom Schlauchboot aus mit einem 600 kHz ADCP, das sehr wahrscheinlich die Strömungsverhältnisse innerhalb der Schichtung messen könnte, nach ähnlichen Verfahren: Ausblenden der ersten 5 m → Parametrisieren → Extrapolieren → Validation der Extrapolation bestätigt oder widerlegt werden.

In Anbetracht der Tatsache, dass die Windkalibrierung des ADCP's an verschiedenen Orten zu verschiedenen Tidezeiten im Kanal Lister Tief und in der Nordsee stattfand, sind weitere Untersuchungen der Extrapolation zu anderen Zeiten und an anderen Orten notwendig. Die Analyse in dieser Ausarbeitung beschränkt sich ausschließlich auf zwei typische Strömungsprofile aus dem Lister Tief. Der hierzu entwickelte Softwareprototyp kann jetzt auf alle Profilmessungen mit dem Schlauchboot angewandt werden, um weitere Erkenntnisse zu Extrapolation sowie ihrer Zuverlässigkeit und der Genauigkeit zu gewinnen. Ein Einfluss der Ungenauigkeit der Extrapolation auf die Windkalibrierung wird ebenfalls gesondert behandelt.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit behandelt die Auswertung der Strömungsdaten erhoben mit dem akustischen Strömungssensor ADCP während verschiedener Schiffseinsätze in den Jahren 2006 bis 2010 in verschiedenen Bereichen der Deutschen Bucht und der Elbmündung. Diese ADCP-Datensätze werden zur Validation bzw. zur Kalibrierung von radarbasierten Fernerkundungssystemen benutzt, die flächenhaft die oberflächennahe Strömung erfassen. Das Radar Doppler Current Profiler (RDCP) misst die Strömung direkt an der Wasseroberfläche während das HF-Radar die Strömung über den obersten Bereich der Wassersäule (ca. 2 m) integriert. Aufgrund des ADCP-Einbaus im Schiffboden muss die Strömung zur Wasseroberfläche hin extrapoliert werden. Vor der Extrapolation, die über eine Parametrisierung der Strömung des gemessenen Teils der Wassersäule unterhalb des Schiffbodens erfolgt, wurden die ADCP-Daten bezüglich ihrer Qualität geprüft.

Während der Nachprozessierung der ADCP-Daten und bei genauer Betrachtung einiger Messergebnisse haben sich folgende technische Fragen ergeben:

- Welche Referenz: Bottom Track, GPS-GGA oder GPS-VTG ist geeigneter für die ADCP-Messung in den drei Messgebieten?

Die Suche nach den Antworten erforderte eine genauere Betrachtung der ADCP-Technik (Hard- und Software) und der Qualität der GPS-Daten, um über den Referenzvergleich die ersten Antworten geben zu können. Dieser Referenzvergleich wurde kombiniert mit der Untersuchung der Auswirkung vom fehlerhaften Salzgehalt auf die Datenqualität durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass die Referenz über GPS-GGA (Änderung der horizontalen Positionen in der Zeit) auch ohne GPS-Korrekturen die beste Lösung in Seegangssituationen liefert und das oft in der Literatur favorisierte Bottom Track bei Gradienten in der Bathymetrie (steilen Sanddünen oder Böschungskanten) oder auch beim Hub der Plattform abweichende bis unplausible Werte bezüglich der Kontinuität der Strömung entstehen lässt. Die horizontale Geschwindigkeitsinformation aus der Dopplerverschiebung des GPS-Signals (enthalten im GPS-VTG-Datentelegramm) ist unabhängig von der Verfügbarkeit der GPS-Korrekturen und bietet eine zuverlässige und hubunempfindliche Lösung. Bei stärkerer Bewegung des Messschiffes (gleichzeitige Einwirkung von Rollen, Stampfen und Hub) lieferte diese Referenz allerdings in einem strömungshomogenen Gebiet häufig unplausible Strömungswerte.

- Welchen Einfluss hat die Plattformbewegung auf die ADCP-Messung und wie ist der Zusammenhang dieser Bewegung zu der Referenz?

Welcher Anteil der unplausiblen Strömungswerten beim Seegang auf den Hub und welcher auf die nicht hinreichende Korrektur der Stampf- und der Rollbewegungen durch die Herstellersoftware entfällt, konnte nicht eindeutig geklärt werden, da zu diesem Zeitpunkt kein PDGPS verwendet wurde. Die Qualität der Höhenbestimmung der GPS Stand Alone Lösung

wurde auf ihre Anwendbarkeit als Informationsquelle für den Hub (innerhalb der Zeitintervalle von 6 Sekunden) anhand einer separaten stationären Messung untersucht und für nicht geeignet befunden. Der Zusammenhang der Plattformbewegung und der Referenzen wurde gleichzeitig mit dem Referenzvergleich durchgeführt und das Ergebnis in Form von Empfehlungen verfasst. Aufgrund der Erfahrung beim Einsatz eines ADCP's während der Seegangssituation wurde die Forderung an eine Integration von einem Bewegungssensor sowie eine Bewegungskorrektur von jedem Ping formuliert.

- Weshalb sind die ADCP-Schlauchbootmessungen mit baugleichem ADCP-Gerät in demselben Messgebiet verrauschter im Vergleich zu der Prandtlmessung?

Der negative Einfluss des Hubs sowie die höher-frequente Roll- und Stampfbewegungen des leichten Schlauchbootes auf die Qualität der ADCP-Messung unterstreicht die Forderung nach der Integration eines Bewegungssensors. Eine Verkürzung von Integrationszeiten der Ensembles sollte bei zukünftigen Messungen die Unzulänglichkeit der ADCP-Software die Bewegungskorrektur exakt anzubringen, kompensieren.

- Besteht die Möglichkeit die Schallgeschwindigkeit abzuschätzen und wenn ja, welche Unsicherheit folgt für die Strömungsbestimmung?

Eine Methode zur Abschätzung des Salzgehaltes und des Einbaufehlers des ADCPs entlang der Schiffsachse wurde vorgestellt. Diese Methode ist an die Bedingung des negativen Ergebnisses des Moving-Bed Tests gebunden. Anhand eines Beispiels aus dem Bereich der Elbmündung wurde diese Methode angewandt, mit den Ergebnissen einer Schallprofilmessung verglichen und als geeignet befunden. Die Auswirkung des abweichenden Salzgehalts auf die Strömung- und die Tiefenmessung wurde diskutiert.

Um einige notwendige Korrekturen und Bereinigungen, die in dem verwendeten Programm WinRiver des Herstellers RDI nicht vorgesehen sind, durchführen zu können, wurde ein Softwareprototyp entwickelt. Die Software umfasst die folgenden Funktionen: Korrektur der Positionsoffsets (GPS-Antenne nicht immer zentrisch über dem ADCP-Sensor), Abfangen der Ausreißer und Aufhänger der Navigationsdaten, Eliminierung von Kurvenfahrten und Ensembles mit zu starken Rollen oder Stampfen, Korrektur des Zeitstempels, sowie Ausblenden der Messwerte im Bereich des Einflusses von Nebenkeulen über dem Meeresboden.

Dieser Softwareprototyp wurde anschließend um die Analyse der bereinigten Strömungsdaten hinsichtlich der Strömungsextrapolation zur Wasseroberfläche erweitert. Hierzu wurden verschiedene mathematische Funktionen wie Geraden, Polynomen (2-ten und 3-ten Grades), Logarithmus- und die Potenzfunktion nach (Chen 1991) implementiert. Um diese Software zu testen wurde ein Datensatz aus einer ADCP-Schlauchbootmessung verwendet. Der oberste Strömungswert stammt aus der Tiefe von ca. 0,5 m unterhalb der Wasseroberfläche. Vermessen wurde die gesamte Wassersäule bis zum Meeresboden. Aus diesem Datensatz

wurden zwei typische Vertikalprofile aus dem Messgebiet Lister Tief (erstes Ensemble zwischen den Sanddünen und zweites Ensemble auf dem Dünenkamm) ausgesucht und nach folgendem Verfahren analysiert:

1. Ausblenden der obersten Tiefe entsprechend der Schwinger-eintauchtiefe von 2,3 m bzw. 5,0 m
2. Parametrisierung
3. Extrapolation
4. Validation der Extrapolation

Im Anschluss konnten folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Form der Parametrisierung der Strömung in der Wassersäule ist geeigneter im Bezug auf die Extrapolation zur Wasseroberfläche im Gebiet Lister Tief?

Die ersten Schlussfolgerungen für die Zuverlässigkeit bestimmter Approximationen konnten bezüglich des Verhältnisses der Approximations- zu Extrapolationstiefe im Zusammenhang mit der Form des Strömungsprofils gemacht werden. Einige Kriterien (Korrelationskoeffizient, Standardabweichung und Mittelwert), die die beste Parametrisierungsform in Abhängigkeit von dem Tiefenverhältnis erkennen lassen, sind genannt worden, müssen aber weiterhin in der Anwendung auf mehrere Profile auf ihre Verlässlichkeit geprüft werden.

- Ist das Teilgebiet, in dem die Radarkalibrierungsmessung durchgeführt wurde, homogen bezüglich der Strömung?

Die Homogenität des Gebietes, von dem die Zuverlässigkeit der Windkalibrierung des RDCP's abhängt, kann anhand weniger Indikatoren wie z.B. der Trend in der horizontalen Richtung und dem Betrag oder den Differenzen zwischen den minimalen und maximalen Strömungswerten, identifiziert werden. Ist ein Gebiet inhomogen, was an einem Beispiel gezeigt wurde, muss in einer weiteren Arbeit der Einfluss dieses Fehlers für diese Windkalibrierung abgeschätzt werden.

- Ist es zulässig ein unvollständiges Vertikalprofil zu parametrisieren und anschließend bis zur Wasseroberfläche zu extrapolieren?

Ein unvollständiges Vertikalprofil zu parametrisieren und zu extrapolieren wurde simuliert und die Ergebnisse diskutiert. Es stellte sich heraus, dass weitere statistische Parameter zusätzlich zu den genannten Kriterien notwendig sind. Des Weiteren ist eine Validation der Extrapolation durch eine Schlauchbootmessung im Bereich der Nordsee erforderlich, um die Zuverlässigkeit der gemachten Aussagen zu überprüfen.

In einer zusätzlichen Arbeit muss der Extrapolationsfehler und seine Auswirkung auf die Windkalibrierung ebenfalls untersucht werden. Eventuell ist die Verwendung eines hydrodynamischen Modells zur Extrapolation geeigneter, um die Zuverlässigkeit und die Genauigkeit der Windkalibrierung und der Validation zu steigern. Zur Validation ist es notwendig, dass das Modell die Winddrift berücksichtigt.

Um die Qualität der zukünftigen ADCP-Messungen steigern zu können, muss der Einfluss der verschiedenen GPS-Qualitätsstufen auf die Strömungsmessung genauer untersucht werden, z.B. in einem stehenden Gewässer. Bei diesem Experiment könnte außerdem die Empfehlung aus der Literatur, die Ensemblezeiten beim Schiffeinsatz auf 1 Sekunde oder kürzer zu setzen, auf ihre Wirksamkeit überprüft werden. Die Bewegung der Messplattform (Rollen, Stampfen und Hub) sollte dann die Strömungsmessung nicht mehr negativ beeinflussen.

Weiterhin sollten der Moving Bed Test und die Schallprofile mindestens ein Mal pro Tidephase gemacht werden und die Methode der empirischen Schallgeschwindigkeitsermittlung (~wirksame Schallgeschwindigkeit?) intensiver untersucht werden bzw. mit einem Bar-Check ähnlichen Test validiert werden.

## Literaturverzeichnis

AiA (2009): „ADCPs in Action!“, Teledyne RD Instruments User's Conference, October 5 – 7, 2009, San Diego, California, USA

Allsat (2007): „Handbuch\_Gyro4\_1\_4.doc“, Hannover, 2007

Aqua Vision (2010): „ViSea DAS Manual Version 3.xx“, Aqua Vision BV, Utrecht, Netherlands

Arai (2003): „Development of a Semi-Spectral Coastal Ocean Model and Its Application to the Neko Seto Sea in the Seto Inland Sea“, Journal of Oceanography, Vol. 60, pp. 597 to 611, 2004

Ashtech (2002): „Manual Ashtech Aquarius-22 Receiver“ Part No. PO101434, Revision B, July 2002, France

BFG (2007): „5. ADCP Anwendertreffen zur Qualitätssicherung von Abflussdaten vom 11.-13. September 2007 in Koblenz“, BFG-1586, 2007 Koblenz

BFG (2004): „4. ADCP Anwendertreffen zur Qualitätssicherung von Abflussdaten vom 05.10. bis zum 07.10.2004 in Koblenz“, BFG-1437, Koblenz

Böder, V. (2002): „Zur hochpräzisen GPS-Positions- und Lagebestimmung unter besonderer Berücksichtigung mariner Anwendungen“, Dissertation an der Uni Hannover, ISSN 0174-1454, Hannover, 2002

Cisewski, B. (2001): „The transport of heat, mass and salt into the Arctic Ocean“, Ber. Polarforsch./Meeresforsch. 378 (2001) ISSN 0176 – 5027

Cisewski, B., Strass, V., Losch, M., & H. Prandke (2007): „Mixed layer analysis of a mesoscale eddy in the Antarctic Polar Front Zone“, Journal of Geophysical Research, VOL. 113, C05017, doi:10.1029/2007JC004372, 2008

Chen, C.-L. (1991). “Unified Theory on Power Laws for Flow Resistance.” Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 117, No. 3, March 1991, 371-389.

Cysewski, M. (2003): „Radarscanning in der Hydrographie“, GKSS-Bericht 2003/26

Cysewski, M., Schymura, G. & F. Ziemer (2007): “Hochauflösende und flächenhafte Vermessung von Oberflächenströmungen mit einem Dopplertisierten Radar.” In: Traub, K.-P. & J. Kohlus (Hrsg.): Geoinformationen für die Küstenzone. Beiträge des 1. Hamburger Symposiums zur Küstenzone. Heidelberg. S. 2-11.

Cysewski, M. & F. Ziemer (2008): “First experiences and applications for Radar Doppler Current Profiler”, Hydro 8 International Conference, 4-6 November 2008, Liverpool, UK

Cysewski, M., Seemann, J. & F. Ziemer (2010): Sea Surface Current Mapping by Radar Doppler Current Profiler, IEEE Conference and Exhibition OCEANS '10, 24–27 May 2010, Sydney, Australia

Kalle, G. & K.Dietrich (1992): „Allgemeine Meereskunde - Eine Einführung in die Ozeanographie“, 3. Auflage, Borntraeger-Berlin-Stuttgart 1975,1992

Egge, D. (2000): Mathematische Geodäsie SS 2000. Unveröffentlichtes Vorlesungsskript. 2000, HAW Hamburg.

Environment Canada (2004): „Procedures for conducting ADCP discharge measurements“, Water Survey of Canada, Hydrometric Operations Division, SOP001–2004

Fairall, C.W., Bradley,E.F., Hare, J.E., Grachev, A.A. & Edson (2003): „Bulk Parameterization of Air–Sea Fluxes: Updates and Verification for the COARE Algorithm“, Journal of Climate , Volume 16, American Meteorological Society, 2003

Geyer, W.R. & Signell,R. (1990): „Measurements of Tidal Flow Around a Headland With a Shipboard Acoustic Doppler Current Profiler“, Journal of Geophysical Research, Vol. 95, NO. C3, Pages 3189-3197, March15, 1990

González,J.A., Melching, C.S. & Oberg, K.A. (1996): „Analysis of Open-Channel Velocity Measurements Collected With an Acoustic Doppler Current Profiler“, RIVERTECH 96, September 22-26, 1996, Chicago, Illinois, USA

Griffiths,G., Bradley, S.E. & S.Ruiz (1997): „Deep Water Bottom-Track Ship's Velocities from an Acoustic Correlation Current Profiler“, Proceedings IEEE Conference Oceans '97, Halifax, Nova Scotia, October 1997

Grossmann, W. (1964): Geodätische Rechnungen und Abbildungen in der Landesvermessung. Verlag Konrad Wittwer. Stuttgart.

Hennings,I. & D.Herbers (2006): „Radar imaging mechanism of marine sand waves at very low grazing angle illumination caused by unique hydrodynamic interactions“, Journal of Geophysical Research, VOL. 111, 2006

IHO (2005): „Manual on Hydrography“, International Hydrographic Bureau, Publication M-13, 1st Edition May 2005 Monaco

Javad (2007): „Bedienungsanleitung GRIL\_Reference\_Guide V2.2“, Copyright Javad Navigation Systems, Inc., October, 2007

Kahmen, H. (1997): Vermessungskunde. Walter de Gruyter. Berlin.

Lueck,R.G. & Y.Lu (1997): „The logarithmic layer in an tidal channel“, Continetal Shelf Resaerch, Vol. 17, No. 14, pp. 1785-1801, Elsevier Science Ltd., UK

Lu,Y. (1997): „Using a Broadband ADCP in a Tidal Channel. Part II: Turbulence“, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology Volume 16, 1998

Mueller & Wagner (2009), „Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat“, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2009

Prinz, K. (2003): „ADCP-Vermessung über Sandwellen im Lister Tief“, GKSS-Bericht 2003/39

RDI (1996): „Acoustic Doppler Current Profiler, Principles of Operation - A Practical Primer“, P/N 951-6069-00, RDI, USA

RDI (2003): „WinRiver User's Guide International Version“, P/N 957-6171-00 (October 2003), RDI, USA

RDI (2007): „WinRiver II User's Guide“, P/N 957-6231-00 (November 2009), RDI, USA

Ruiz, S., Font, J., Griffiths, G. & A. Castellon (2002): „Estimation of heading gyrocompass error using a GPS 3DF system: Impact on ADCP measurements“, SCIENTIA MARINA, 2002

Schlichting, H. & K. Gersten (2003), „Boundary Layer Theory“, Springer-Verlag, 2003

SonTek (2010): „RiverSurveyor\_Hintergrundinformationen“, [www.quantum-hydrometrie.de](http://www.quantum-hydrometrie.de)

Souza, A. (2007): „The Use of ADCPs to Measure Turbulence and SPM in Shelf Seas“, 2nd International Conference & Exhibition on "Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results", Crete, Greece, 2007

Takasugi, Y., Hoshika, A., Noguchi, H. & T. Tanimoto (1994): „The Role of Tidal Vortices in Material Transport around Straits“, Journal of Oceanography Vol. 50, pp.65 to 80. 1994

USGS (2005): „ADCP Toolbox Manual“, U.S. Geological Survey Open File Report 00-458 Version 3: September 2005

USGS (2009): „Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using Acoustic Doppler Current Profilers“, U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, Scientific Investigations Report 2005-5183

Urick, R.J. (1983): „Principles of Underwater Sound“, Third Edition, McGraw-Hill, New York.

VDV (1995): „Vermessungspraxis mit GPS. Grundlagen - Grenzen - Geräte“, Verband Deutscher Vermessungsingenieure e. V. (VDV) band 13, Verlag Chmielorz, Wiesbaden

Vennell, R. & R. Beatson (2006): „Moving Vessel ADCP Measurement of Tidal Streamfunction using Radial Basis Functions“, Journal of Geophysical Research, 2006

**Internetquellen:**

[www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de)

[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

[www.coastalwiki.org](http://www.coastalwiki.org)

[http://currents.soest.hawaii.edu/docs/adcp\\_doc/codas\\_setup/hg\\_install.html](http://currents.soest.hawaii.edu/docs/adcp_doc/codas_setup/hg_install.html)

[www.rdinstruments.com](http://www.rdinstruments.com)

[www.sontek.com](http://www.sontek.com)

[www.nortek-as.com](http://www.nortek-as.com)

[www.aanderaa.com](http://www.aanderaa.com)

[www.link-quest.com](http://www.link-quest.com)

[www.ott-hydrometry.de](http://www.ott-hydrometry.de)

[www.aquavision.nl](http://www.aquavision.nl)

**CD-ROM:**

„Top50 Schleswig-Holstein/Hamburg (Version 4)“, ISBN 3-89130-258-4

„Meyers Taschenlexikon auf CD“, Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG,  
Mannheim 2001

# ***ANHANG***

*ANHANG A: Bilder der ADCP Trägerplattformen*



Abb. A1: Forschungsschiff „Heinke“  
(Quelle: <http://www.awi.de/de/infrastruktur/schiffe/heinke/>)



Abb. A2: Forschungsschiff „Ludwig Prandtl“  
(Autor G.Schymura Radarhydrographie)

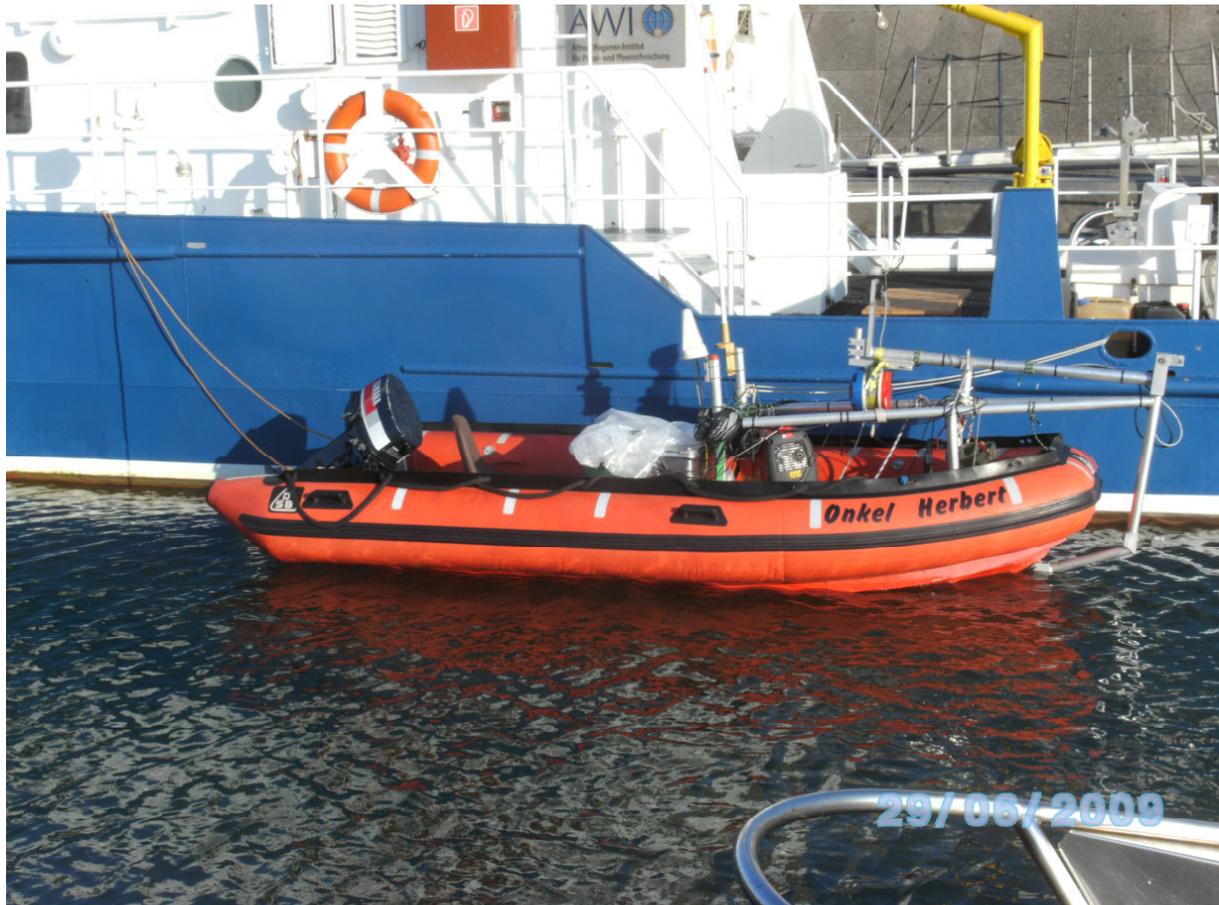
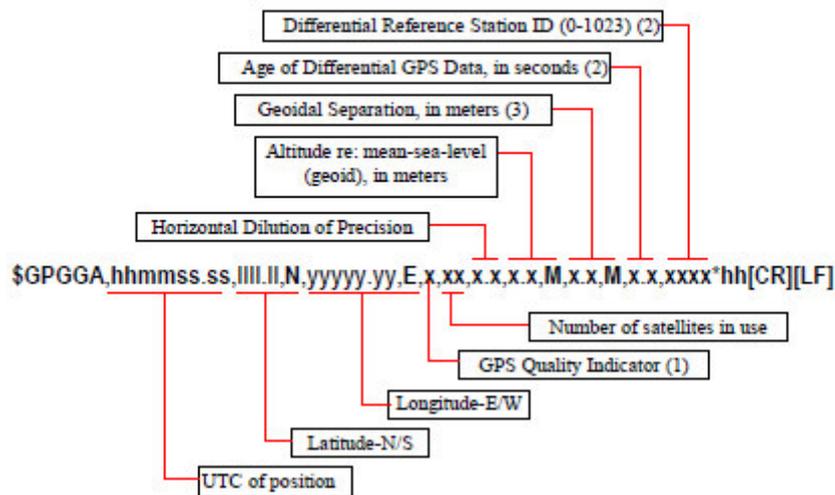


Abb. A3: Schlauchboot „Onkel Herbert“  
(Autor G.Schymura Radarhydrographie/HZG)

## ANHANG B: GPS-Datentelegramme nach (Ashtech 2003)

### B1. GGA-String: Uhrzeit, 3D-Position, Qualität, ...



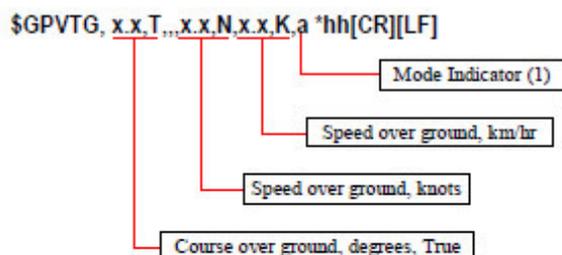
#### (1) GPS Quality Indicator:

- 0: Fix not available or invalid
- 1: GPS SPS Mode, fix valid
- 2: Differential GPS, SPS Mode, fix valid
- 4: Real Time Kinematic (KART, LRK)
- 5: EDGPS
- 6: Estimated (Dead Reckoning) Mode

#### (2) Null (empty) field if DGPS Mode invalid

(3) Difference between the WGS84 earth ellipsoid surface and mean-sea-level (geoid) surface. "-" sign = mean-sea-level surface below WGS84 ellipsoid surface.

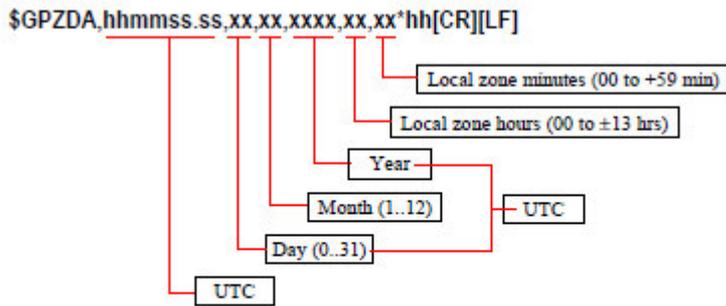
### B2. VTG-String: Kurs- und Geschwindigkeitsstring



#### (1) Mode Indicator:

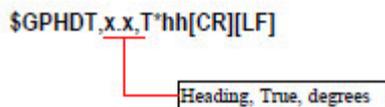
- A = Autonomous Mode
- D = Differential Mode
- E = Estimated (Dead Reckoning) Mode
- N = Data not valid

### B3. ZDA-String: UTC-Zeitstempel



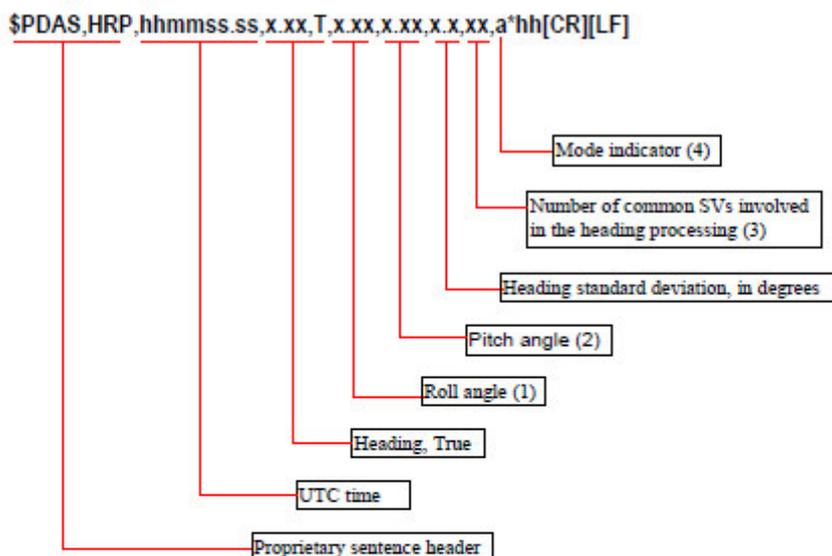
The two sentences only differ by the way they are output: in time mode for No. 5, in 1PPS mode for No. 18.

### B4. HDT-String: Schiffskurs



### B4. HRP-String: Heading, Roll und Pitch

Message length: 57 characters max.



- (1) ± 90°, positive if port up & starboard down, not signed if positive, blank field if invalid
- (2) ± 90°, positive if bow up & stern down, not signed if positive, blank field if invalid
- (3) Number of satellites received concurrently by the two GPS antennas
- (4) Mode indicator
  - A = Autonomous Mode
  - E = Estimated (Dead Reckoning) Mode
  - N = Data not valid

## ANHANG C: ADCP-Datenbeispiel und Format-spezifikationen

### C1. RDI classic ASCII-Output Beispiel

L.Prandtl

Mai2006 Lister Tief

```
6 5 11 13 28 17 66 2295 1 0.750 1.100 67.700 13.360
323.61 128.13 0.00 0.00 0.00 5.94 0.02 13.07 23.18 22.75 23.39 22.75
7.03 2.02 2.59 6.54 7.03
55.0173048 8.4427055 323.61 128.13 7.0
37.2 6.3 5.4 0.0 0.0 0.0 0.0 2.80 19.30
45 cm VTG dB 0.43 0.139
2.80 33.81 351.99 -4.7 33.5 3.0 -8.0 74.7 72.5 72.1 74.2 100 1.16
3.30 46.16 14.69 11.7 44.7 8.2 11.8 73.1 71.8 70.1 73.1 100 1.31
3.80 63.83 13.96 15.4 61.9 0.3 -8.6 73.5 71.3 70.4 75.2 100 1.83
4.30 54.22 23.20 21.4 49.8 3.6 -3.6 70.3 71.6 69.9 72.9 100 1.35
4.80 64.63 19.77 21.9 60.8 3.5 -8.2 70.3 70.3 67.7 71.6 100 1.70
5.30 50.09 13.81 12.0 48.6 2.4 -15.6 70.0 69.2 67.9 71.3 100 1.44
5.80 53.44 17.28 15.9 51.0 1.2 0.4 69.4 67.7 66.8 71.1 100 1.46
6.30 61.53 16.15 17.1 59.1 -0.7 7.0 67.9 70.1 66.6 70.5 100 1.71
6.80 55.68 25.81 24.2 50.1 -0.6 14.0 67.7 68.1 66.4 70.7 100 1.32
7.30 68.86 29.89 34.3 59.7 -2.1 3.1 67.7 69.0 66.4 69.9 100 1.51
7.80 47.85 19.00 15.6 45.2 1.9 11.2 66.4 69.0 66.4 69.5 100 1.28
8.30 47.13 12.89 10.5 45.9 -2.1 21.1 67.3 66.8 66.4 69.0 100 1.37
8.80 46.92 42.87 31.9 34.4 1.5 -7.2 66.7 67.6 65.4 68.4 100 0.71
9.30 40.23 45.06 28.5 28.4 -5.8 10.2 67.0 66.6 65.3 68.7 100 0.56
9.80 56.65 10.21 10.0 55.8 -2.1 19.8 66.9 66.0 64.3 68.6 100 1.69
10.30 66.80 17.30 19.9 63.8 0.9 -2.9 65.4 65.8 64.1 67.9 100 1.83
10.80 58.83 16.71 16.9 56.3 1.5 3.4 64.7 65.1 65.6 67.3 100 1.62
11.30 42.91 42.66 29.1 31.6 -2.2 7.6 64.4 64.9 64.0 66.2 100 0.66
11.80 31.80 359.76 -0.1 31.8 -4.2 0.8 63.3 64.2 62.0 65.0 100 1.04
12.30 35.42 37.63 21.6 28.1 2.0 -3.6 61.7 63.4 63.0 65.2 100 0.64
12.80 53.80 24.29 22.1 49.0 3.8 4.0 60.5 63.5 62.7 64.0 100 1.32
13.30 40.25 32.32 21.5 34.0 0.8 -18.4 62.3 62.3 61.5 65.4 100 0.83
13.80 39.69 34.81 22.7 32.6 6.1 -17.9 60.7 62.0 59.8 62.9 100 0.77
14.30 15.65 8.59 2.3 15.5 0.2 -9.4 61.2 63.8 60.8 63.3 100 0.48
14.80 27.52 347.63 -5.9 26.9 1.9 -16.9 60.8 62.1 58.7 60.4 100 0.95
15.30 26.91 343.00 -7.9 25.7 0.9 5.1 59.1 60.9 59.1 60.9 100 0.94
15.80 8.68 16.71 2.5 8.3 0.8 10.3 58.7 61.3 58.3 60.5 100 0.24
16.30 38.47 18.64 12.3 36.4 -2.1 -2.4 59.2 59.6 57.9 59.2 100 1.03
16.80 24.85 31.54 13.0 21.2 -2.0 1.0 59.6 60.0 58.8 59.6 100 0.52
17.30 37.19 16.81 10.8 35.6 -4.9 -9.4 58.8 60.5 58.3 60.0 100 1.02
17.80 28.65 24.81 12.0 26.0 -1.4 -8.3 58.3 60.0 57.0 60.0 100 0.69
18.30 37.62 358.70 -0.9 37.6 -3.0 16.3 58.7 58.7 57.0 59.2 100 1.24
18.80 22.64 341.65 -7.1 21.5 -1.2 -10.8 58.3 59.6 57.4 59.1 100 0.79
19.30 30.94 57.43 26.1 16.7 -5.1 -3.8 71.6 71.1 80.2 68.6 100 0.21
19.80 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 59.5 66.8 65.5 59.9 0 2147483647
20.30 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 59.0 61.2 59.0 59.4 0 2147483647
20.80 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 65.0 60.2 57.2 62.8 0 2147483647
21.30 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 60.2 63.2 57.6 65.3 0 2147483647
21.80 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 66.6 98.0 63.1 94.5 0 2147483647
22.30 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 102.2 100.9 93.2 108.6 0 2147483647
22.80 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 95.7 255 103.0 255 0 2147483647
23.30 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 255 255 255 255 0 2147483647
23.80 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 255 255 255 255 0 2147483647
24.30 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 255 255 255 255 0 2147483647
24.80 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 255 255 255 255 0 2147483647
```

**C2. RDI classic ASCII-Output Datenformat**  
(Quelle: RDI 2009, Seite 76)

Row	Field	Description
A	1	NOTE 1 - You can enter these lines by right-clicking <b>Transect</b> and selecting <b>Add Note</b> (see <a href="#">Add Note</a> ).
B	1	NOTE 2 - You can enter these lines by right-clicking <b>Transect</b> and selecting <b>Add Note</b> (see <a href="#">Add Note</a> ).
C	1	DEPTH CELL LENGTH (cm)
	2	BLANK AFTER TRANSMIT (cm)
	3	ADCP DEPTH FROM CONFIGURATION NODE (cm)
	4	NUMBER OF DEPTH CELLS
	5	NUMBER OF PINGS PER ENSEMBLE
	6	TIME PER ENSEMBLE (hundredths of seconds)
	7	PROFILING MODE

Row	Field	Description
1	1	ENSEMBLE TIME -Year (at start of ensemble)
	2	- Month
	3	- Day
	4	- Hour
	5	- Minute
	6	- Second
	7	- Hundredths of seconds
	8	ENSEMBLE NUMBER (or SEGMENT NUMBER for processed or averaged raw data)
	9	NUMBER OF ENSEMBLES IN SEGMENT (if averaging ON or processing data)
	10	PITCH - Average for this ensemble (degrees)
	11	ROLL - Average for this ensemble (degrees)
	12	CORRECTED HEADING - Average ADCP heading (corrected for one cycle error) + heading offset + magnetic variation
	13	ADCP TEMPERATURE - Average for this ensemble (°C)
2	1	BOTTOM-TRACK VELOCITY - East(+)/West(-); average for this ensemble (cm/s or ft/s)
	2	Reference = BTM - North(+)/South(-)
	3	- Vertical (up[+]/down[-])
	4	- Error
2	1	BOTTOM-TRACK VELOCITY - GPS (GGA or VTG) Velocity (calculated from GGA String) Reference = GGA East(+)/West (-)
	2	Reference = VTG - GPS (GGA or VTG) North(+)/South(-) Velocity
	3	- BT (up[+]/down[-]) Velocity
	4	- BT Error
	5	GPS/DEPTH SOUNDER - corrected bottom depth from depth sounder (m or ft) as set by user (negative value if DBT value is invalid)
	6	- GGA altitude (m or ft)
	7	- GGA Δaltitude (max - min, in m or ft)

Row	Field	Description
	8	- GGA HDOP x 10 + # satellites/100 (negative value if invalid for ensemble)
	9	<b>DEPTH READING</b> - Beam 1 average for this ensemble (m or ft, as set by user)
	10	(Use Depth - Beam 2
	11	Sounder = NO) - Beam 3
	12	- Beam 4
	9	<b>DEPTH READING</b> - Depth Sounder depth
	10	(Use Depth - Depth Sounder depth
	11	Sounder = Yes) - Depth Sounder depth
	12	- Depth Sounder depth
3	1	<b>TOTAL ELAPSED DISTANCE</b> - Through this ensemble (from bottom-track or GPS data; in m or ft)
See	2	<b>TOTAL ELAPSED TIME</b> - Through this ensemble (in seconds)
Note	3	<b>TOTAL DISTANCED TRAVELED NORTH</b> (m or ft, as set by user)
	4	<b>TOTAL DISTANCED TRAVELED EAST</b> (m or ft, as set by user)
	5	<b>TOTAL DISTANCE MADE GOOD</b> - Through this ensemble (from bottom-track or GPS data in m or ft)
4	1	<b>NAVIGATION DATA</b> -
See	2	- Latitude (degrees and decimal degrees)
Note	3	- Longitude (degrees and decimal degrees)
	4	- GGA or VTG East velocity (in m/s or ft/s)
	5	- GGA or VTG North velocity (in m/s or ft/s)
	6	- Distance traveled in m or ft reference to GGA or VTG
5	1	<b>DISCHARGE VALUES</b> - Middle part of profile (measured); m <sup>3</sup> /s or ft <sup>3</sup> /s
	2	(referenced to - Top part of profile (estimated); m <sup>3</sup> /s or ft <sup>3</sup> /s
	3	Ref = BTM - Bottom part of profile (estimated); m <sup>3</sup> /s or ft <sup>3</sup> /s
	4	and Use Depth - Start-shore discharge estimate; m <sup>3</sup> /s or ft <sup>3</sup> /s
	5	Sounder - Starting distance (boat to shore); m or ft
	6	options) - End-shore discharge estimate; m <sup>3</sup> /s or ft <sup>3</sup> /s
	7	- Ending distance (boat to shore); m or ft
	8	- Starting depth of middle layer (or ending depth of top layer); m or ft
	9	- Ending depth of middle layer (or starting depth of bottom layer); m or ft
6	1	<b>NUMBER OF BINS TO FOLLOW</b>
	2	<b>MEASUREMENT UNIT</b> - cm or ft
	3	<b>VELOCITY REFERENCE</b> - BT, GGA, VTG, or NONE for current velocity data rows 7-26 fields 2-7
	4	<b>INTENSITY UNITS</b> - dB or counts
	5	<b>INTENSITY SCALE FACTOR</b> - in dB/count
	6	<b>SOUND ABSORPTION FACTOR</b> - in dB/m
7-26	1	<b>DEPTH</b> - Corresponds to depth of data for present bin (depth cell); includes ADCP depth and blanking value; in m or ft.
	2	<b>VELOCITY MAGNITUDE</b>
	3	<b>VELOCITY DIRECTION</b>
	4	<b>EAST VELOCITY COMPONENT</b> - East(+)/West(-)
	5	<b>NORTH VELOCITY COMPONENT</b> - North(+)/South(-)
	6	<b>VERTICAL VELOCITY COMPONENT</b> - Up(+)/Down(-)
	7	<b>ERROR VELOCITY</b>
	8	<b>BACKSCATTER</b> - Beam 1
	9	- Beam 2
	10	- Beam 3
	11	- Beam 4
	12	<b>PERCENT-GOOD</b>
	13	<b>DISCHARGE</b>

## **ANHANG D: ADCP-Profile**

D1:	Prandtlprofil 010 vom 12.05.2006 während der Flutphase im Messgebiet Königshafen/Lister Tief.....	111
D2:	Schlauchbootprofil 003 vom 22.05.2007 während der Ebbphase im Messgebiet Lister Tief .....	115
D3:	Prandtlprofil 178 vom 23.05.2007 während der Ebbphase Messgebiet Lister Tief .....	118
D4:	Heinckeprofil 021 vom 09.09.2008 aus dem Messgebiet 2 westlich vor Helgoland.....	121
D5:	Heinckeprofil 140 vom 23.09.2009 aus dem Messgebiet 2 zwischen Helgoland und der Wesermündung .....	124
D6:	Prandtlprofil 041 vom 06.06.2010 erhoben im Messgebiet 3 der Elbmündung .....	127

**D1: Prandtlprofil 010 vom 12.05.2006 während der Flutphase im Messgebiet  
Königshafen/Lister Tief**

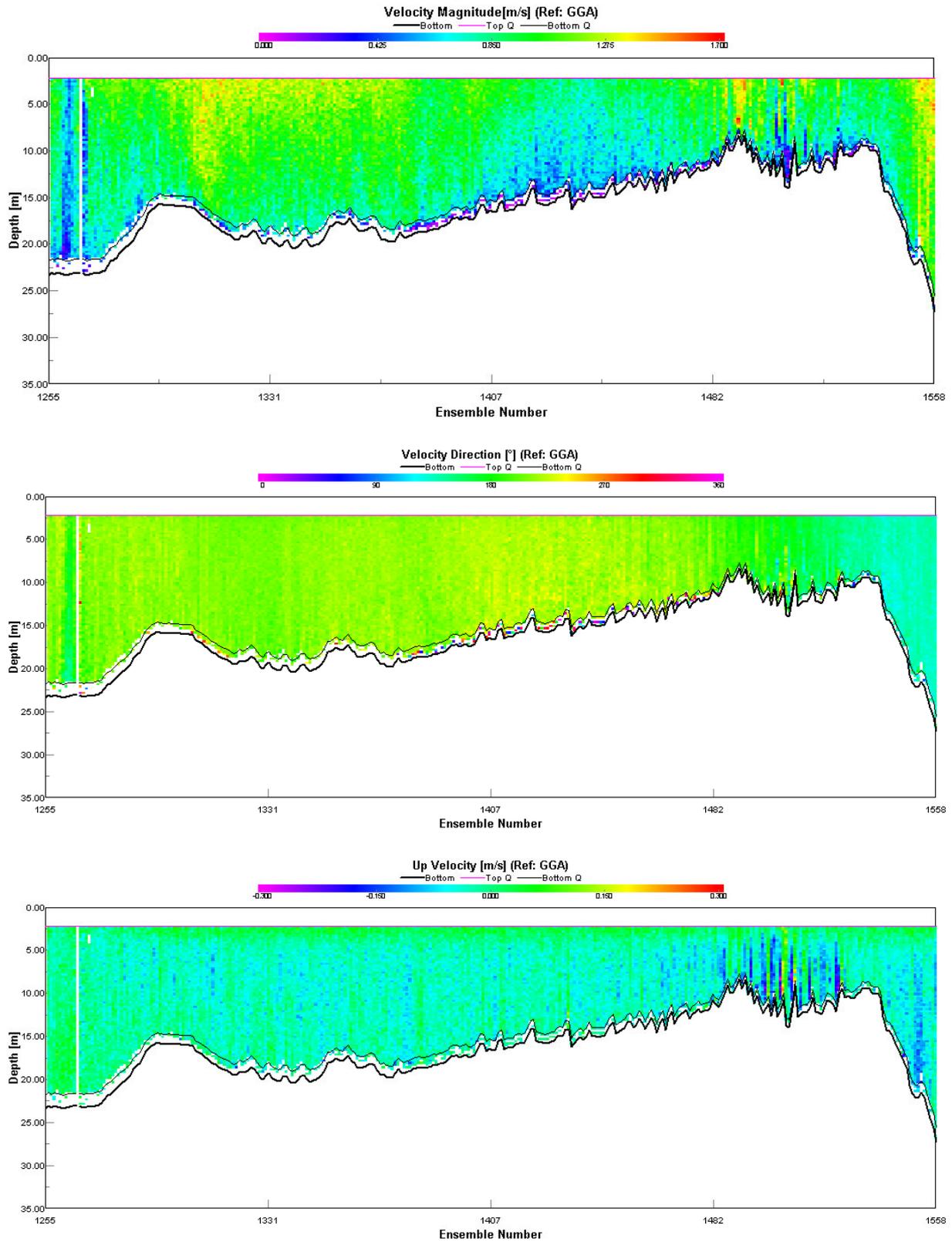


Abb. D1 a-c: horizontaler Betrag , horizontale Richtung sowie die vertikale Komponente der Strömung im Messgebiet 1 Königshafen/Lister Tief. Profilnr. 010 vom 12.05.2006. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver

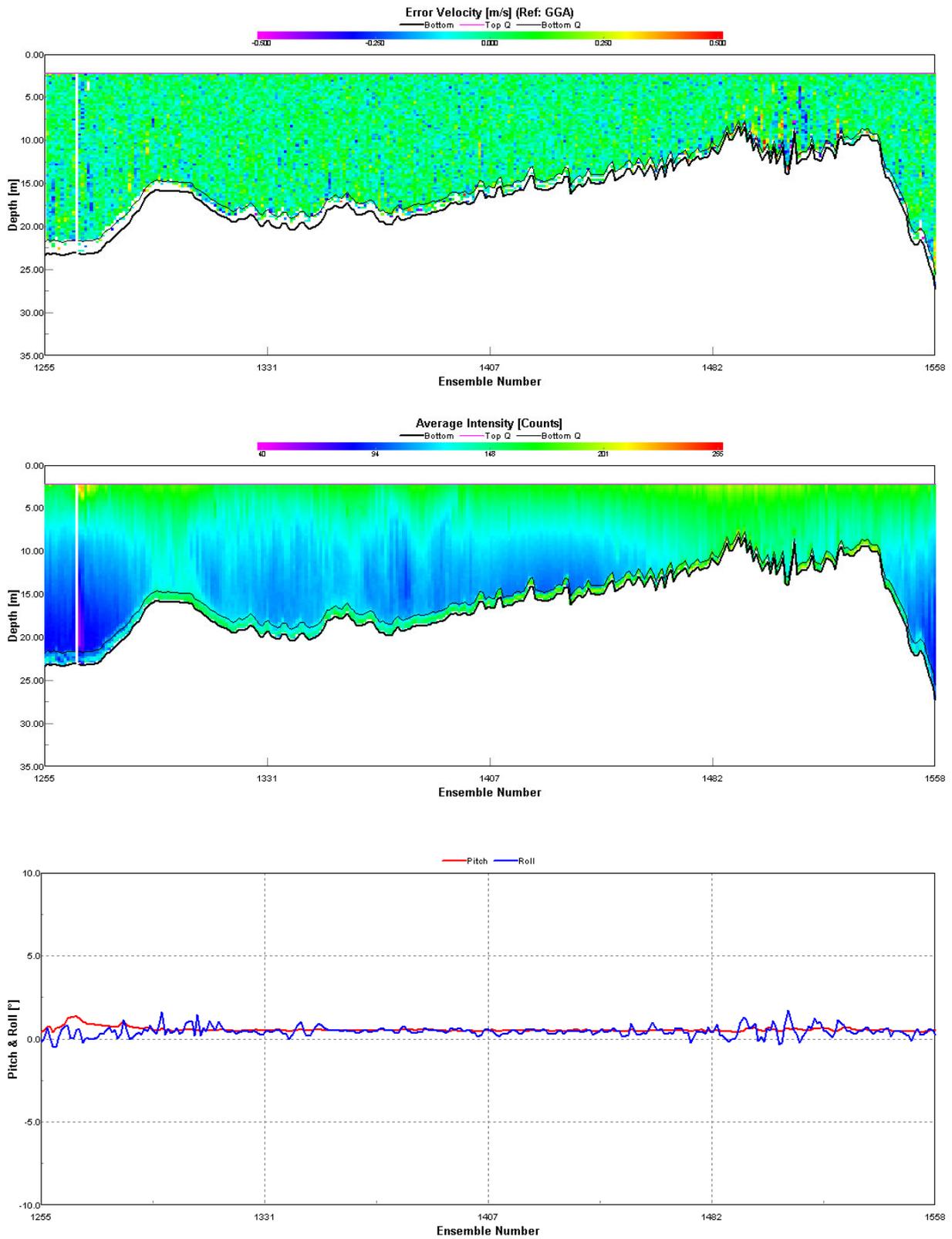


Abb. D1 d-f: Error-velocity , Intensität sowie Stampf und Rollwinkel aus dem Profil 010 vom 12.05.2006. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

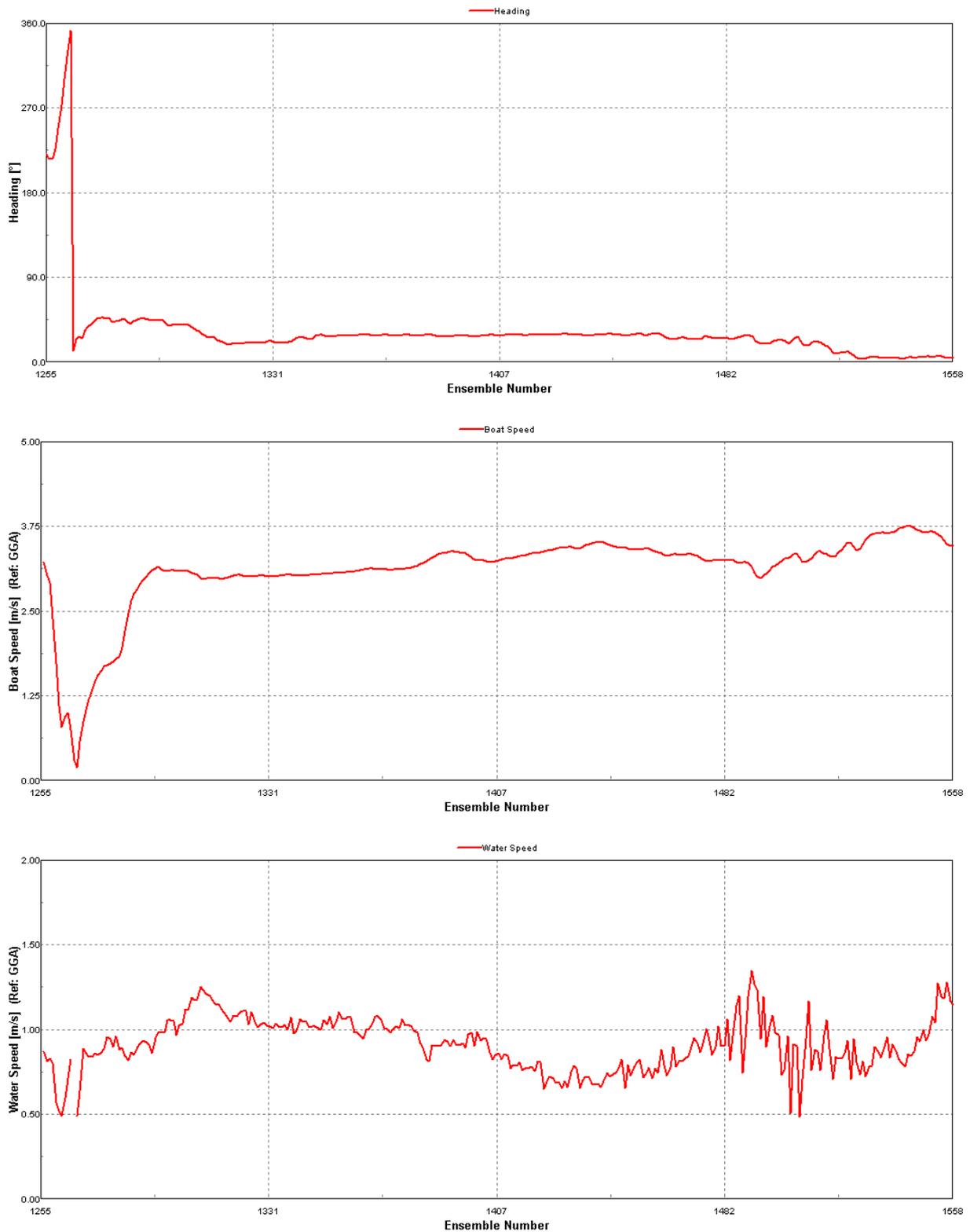


Abb. D1 g-i: Schiffskurs , Schiffsgeschwindigkeit sowie mittlere Geschwindigkeit der Strömung im Messgebiet 1 Königshafen/Lister Tief. Profilnr. 010 vom 12.05.2006. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

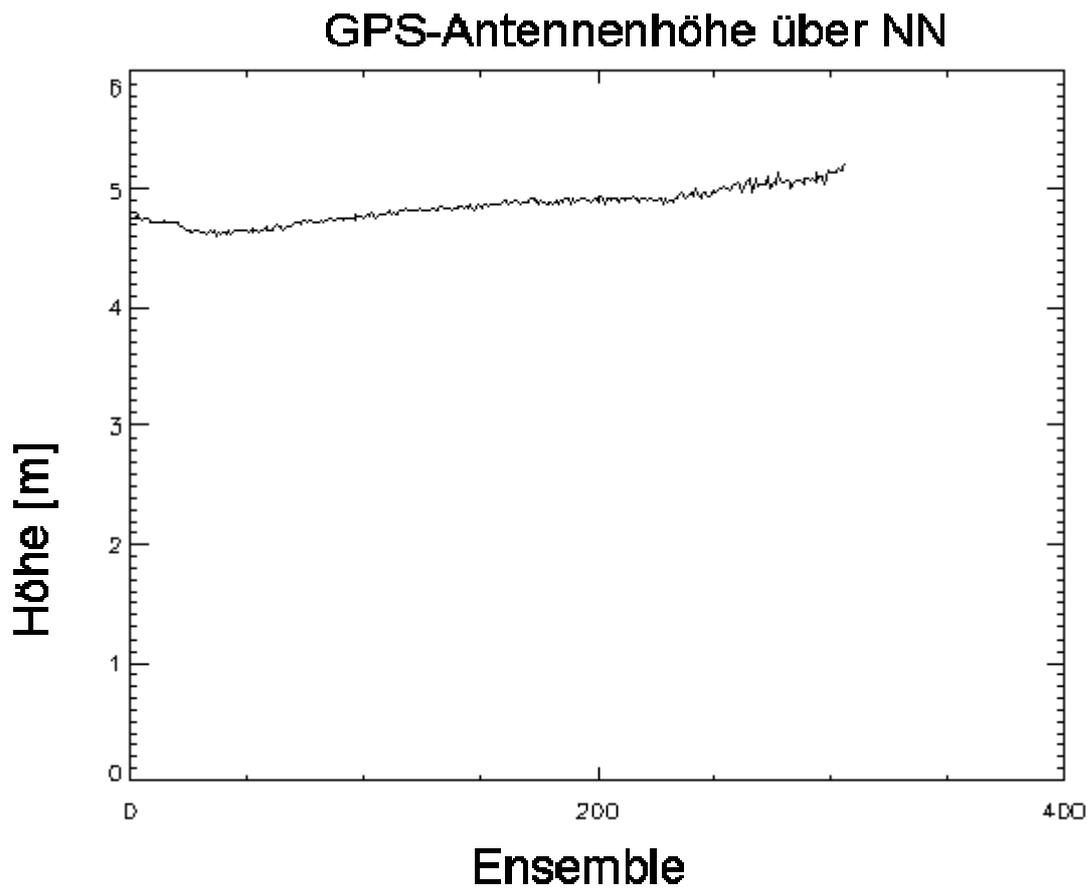


Abb. D1 j: GPS-Höhe gemittelt auf Ensemble während des Profils 010 vom 12.05.2006.

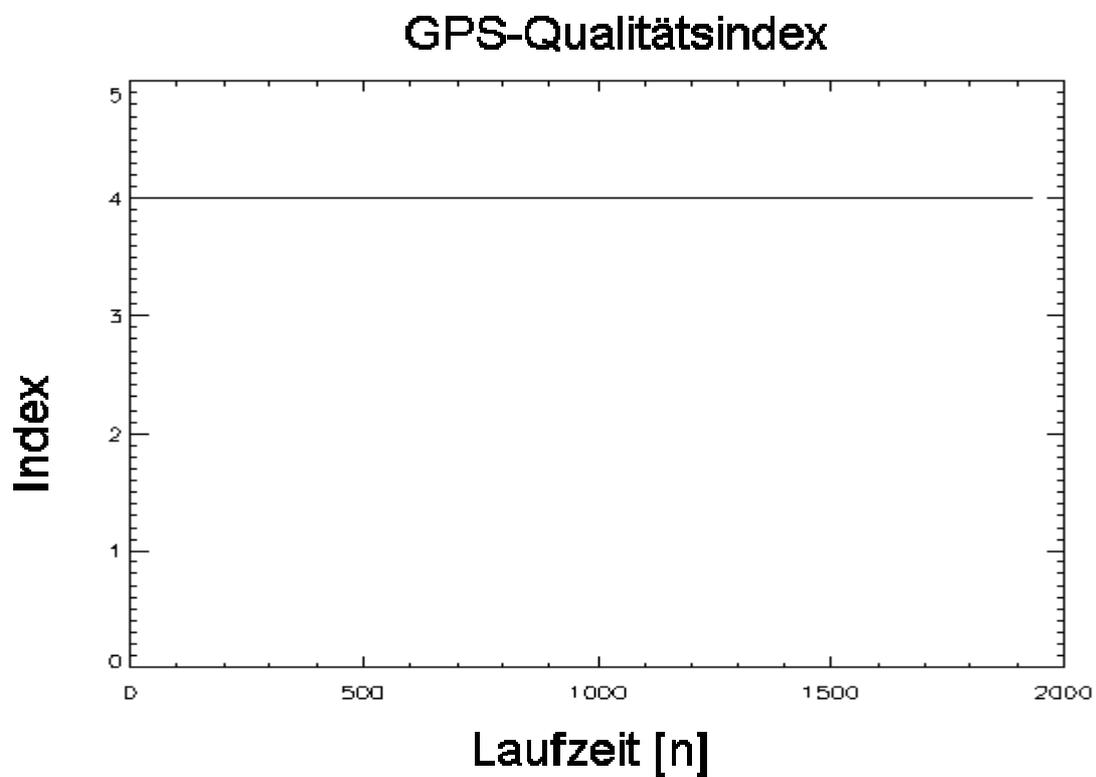


Abb. D1 k: GPS-Qualitätsindex gemittelt während des Profils 010 vom 12.05.2006.

## D2: Schlauchbootprofil 003 vom 22.05.2007 während der Ebbphase im Messgebiet Lister Tief

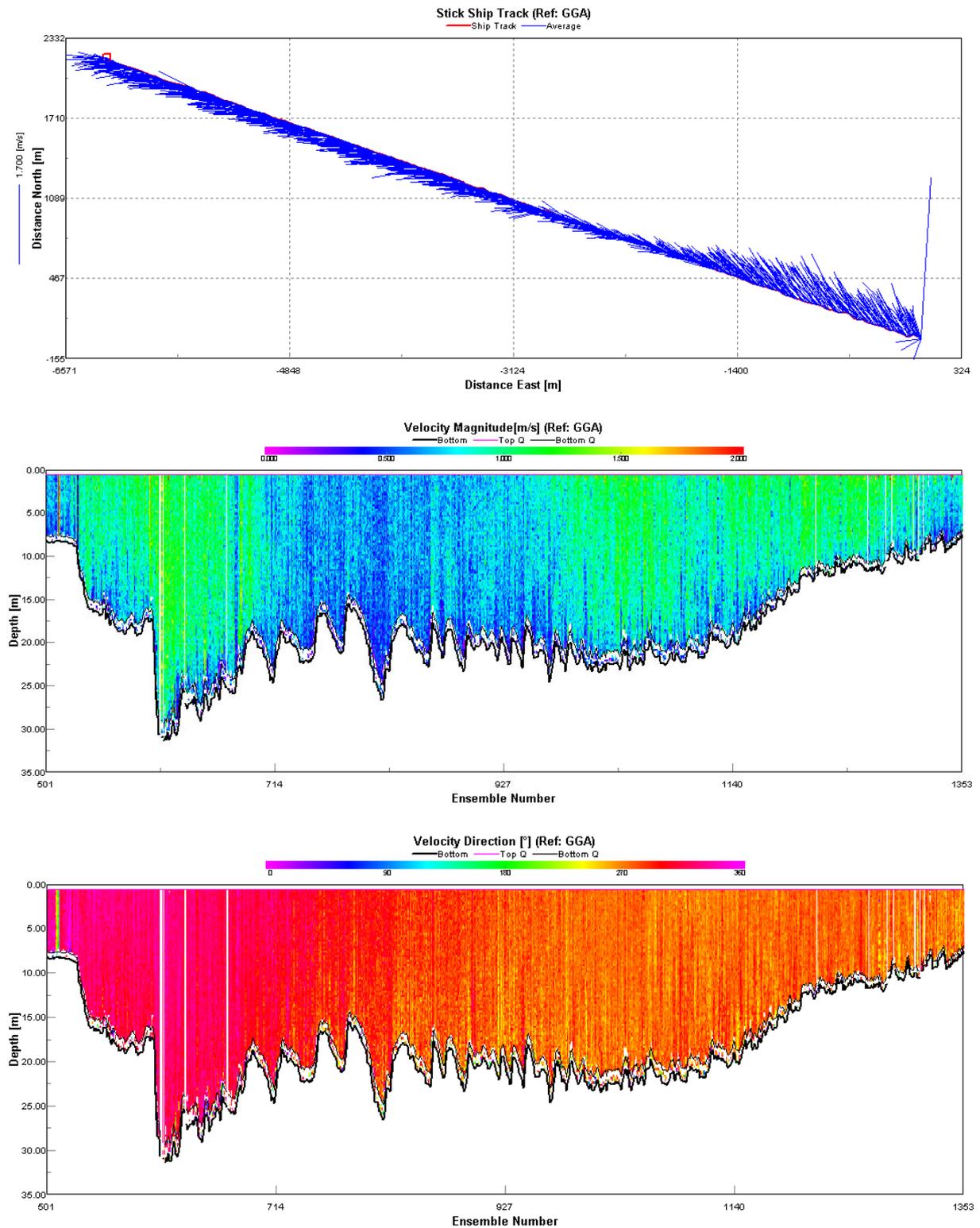


Abb. D2 a-c: gemittelte Strömungsvektoren , horizontaler Betrag sowie horizontale Richtung aus Messgebiet 1 Lister Tief. Profilnr. 010 vom 22.05.2007. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

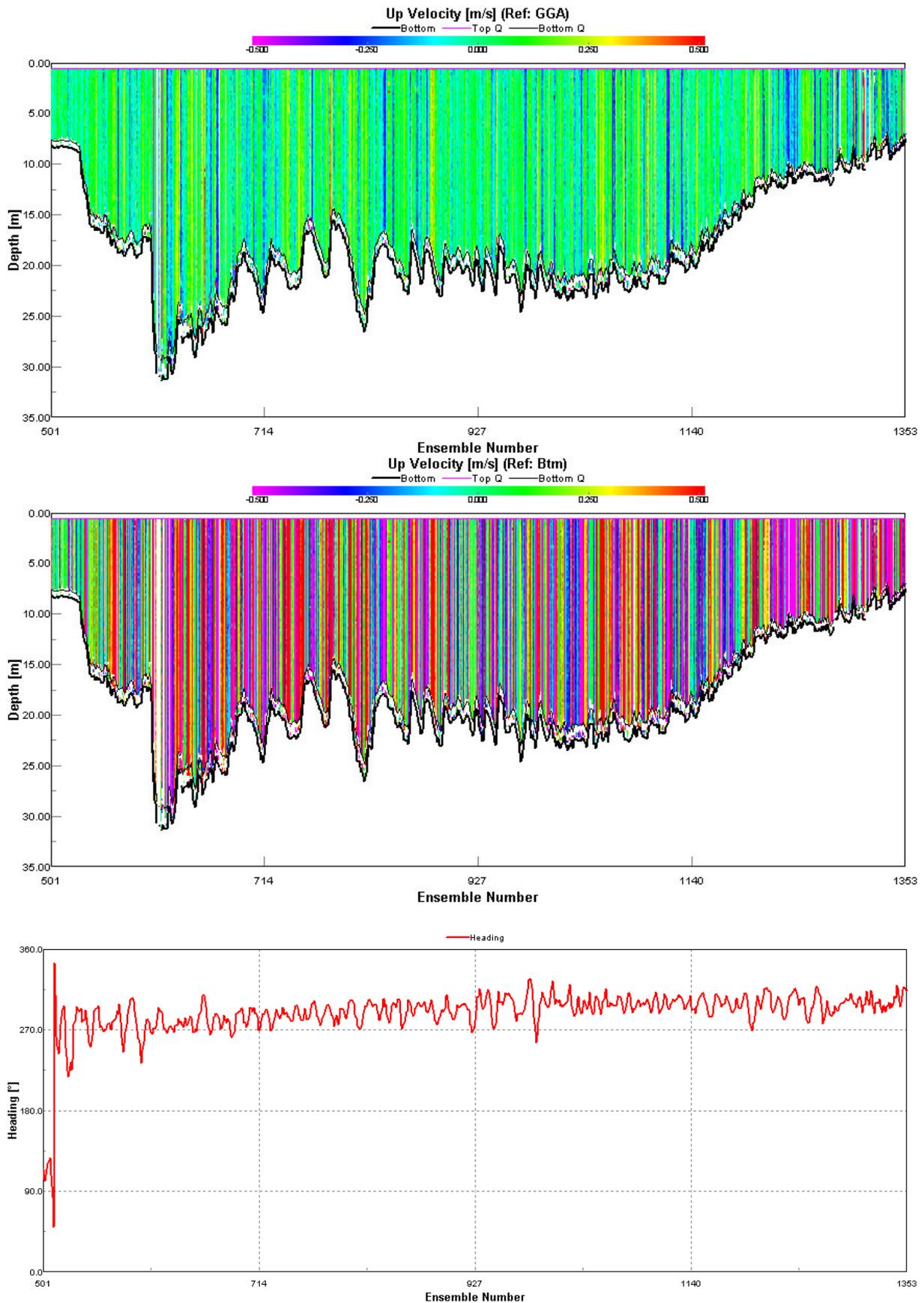


Abb. D2 d-f: Vertikale Strömungskomponente referenziert über GPS-GGA und BTM sowie der Schiffskurs während der Profilnr. 010 vom 22.05.2007. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver

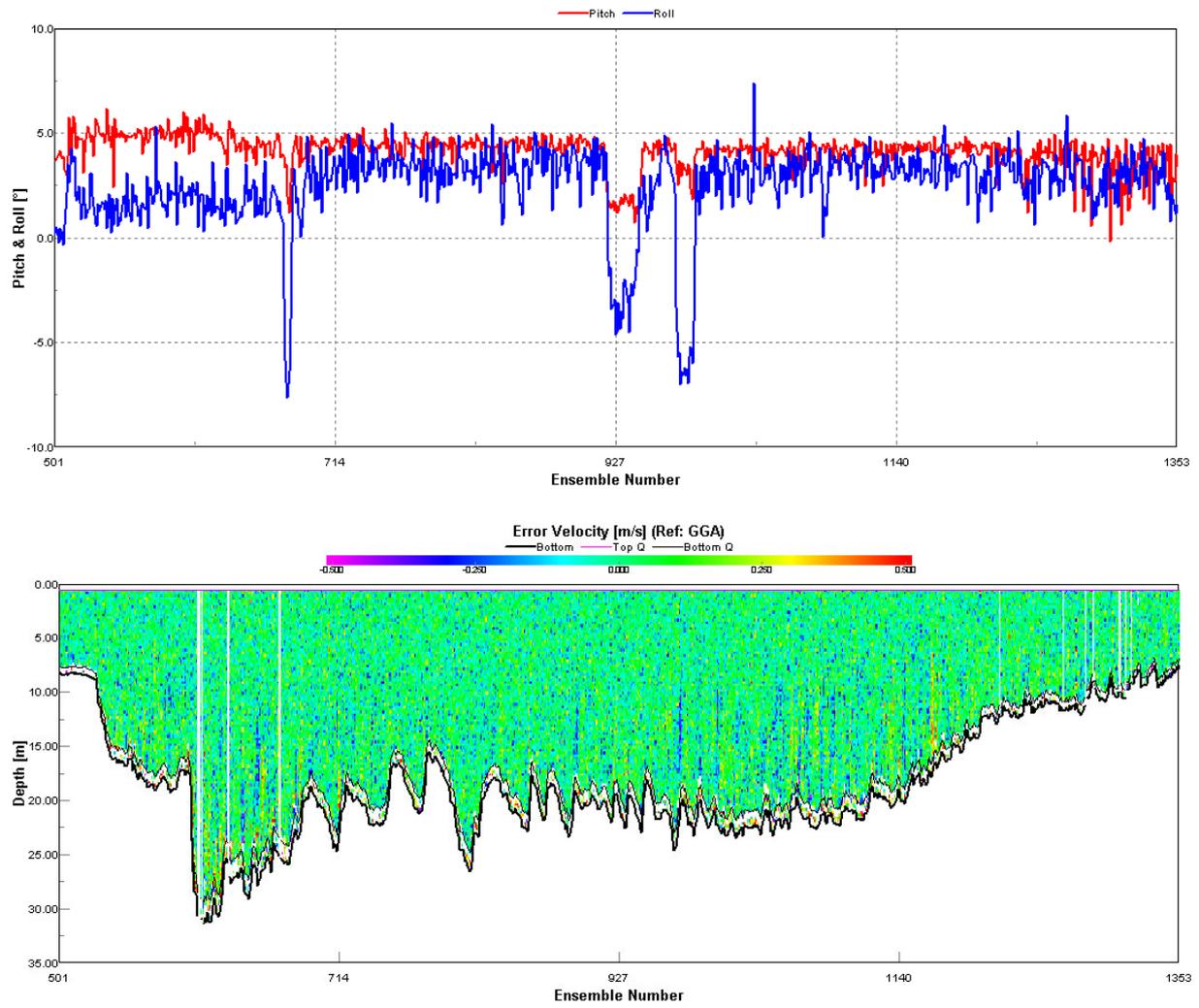


Abb. D2 g-h: Roll und Stampfwinkel sowie Error-velocity während der Profilnr. 010 vom 22.05.2007

**D3: Prandtlprofil 178 vom 23.05.2007 während der Ebbphase Messgebiet Lister Tief**

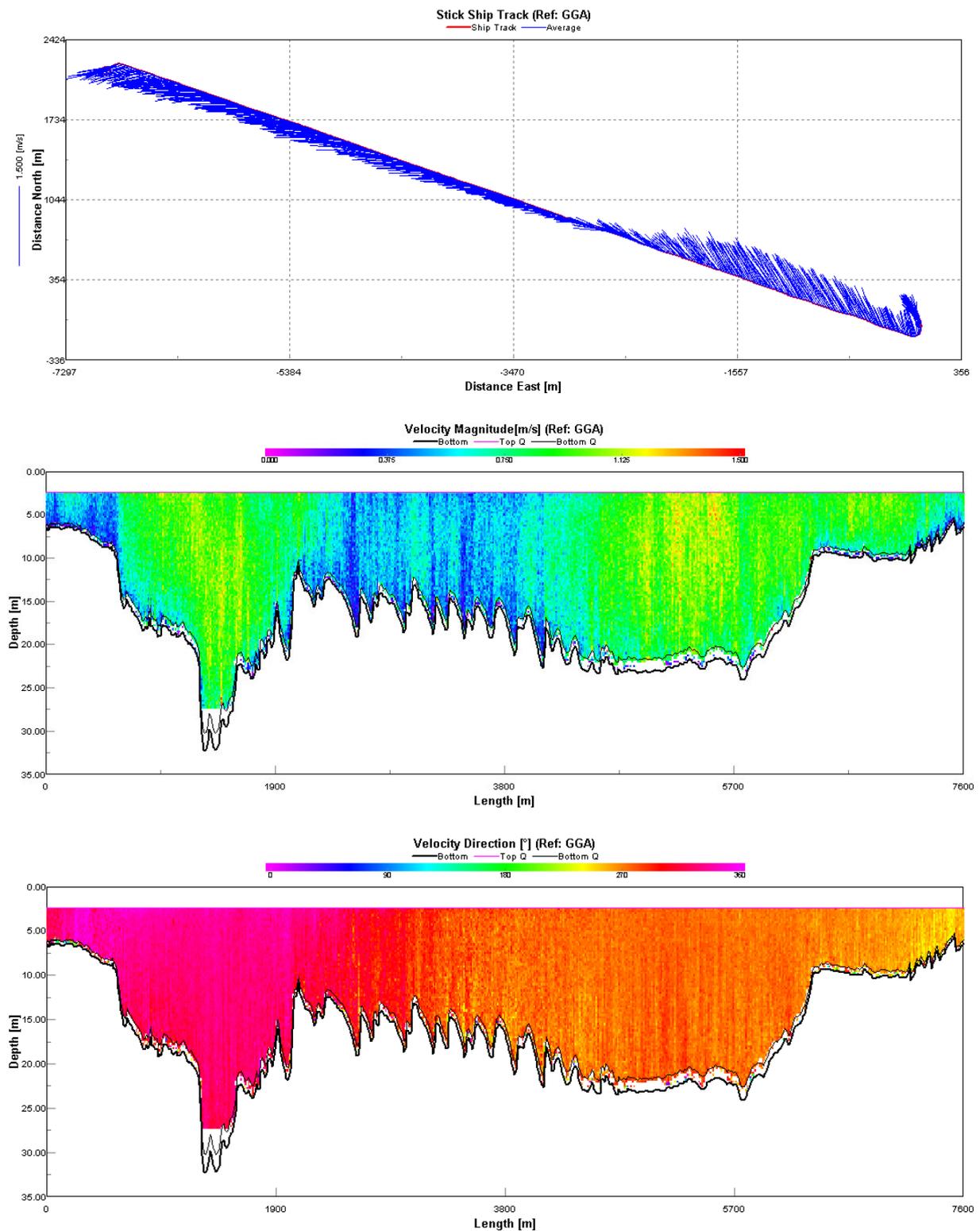


Abb. D3 a-c: gemittelte Strömungsvektoren , horizontaler Betrag sowie horizontale Richtung aus Messgebiet 1 Lister Tief. Profilnr. 178 vom 23.05.2007. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

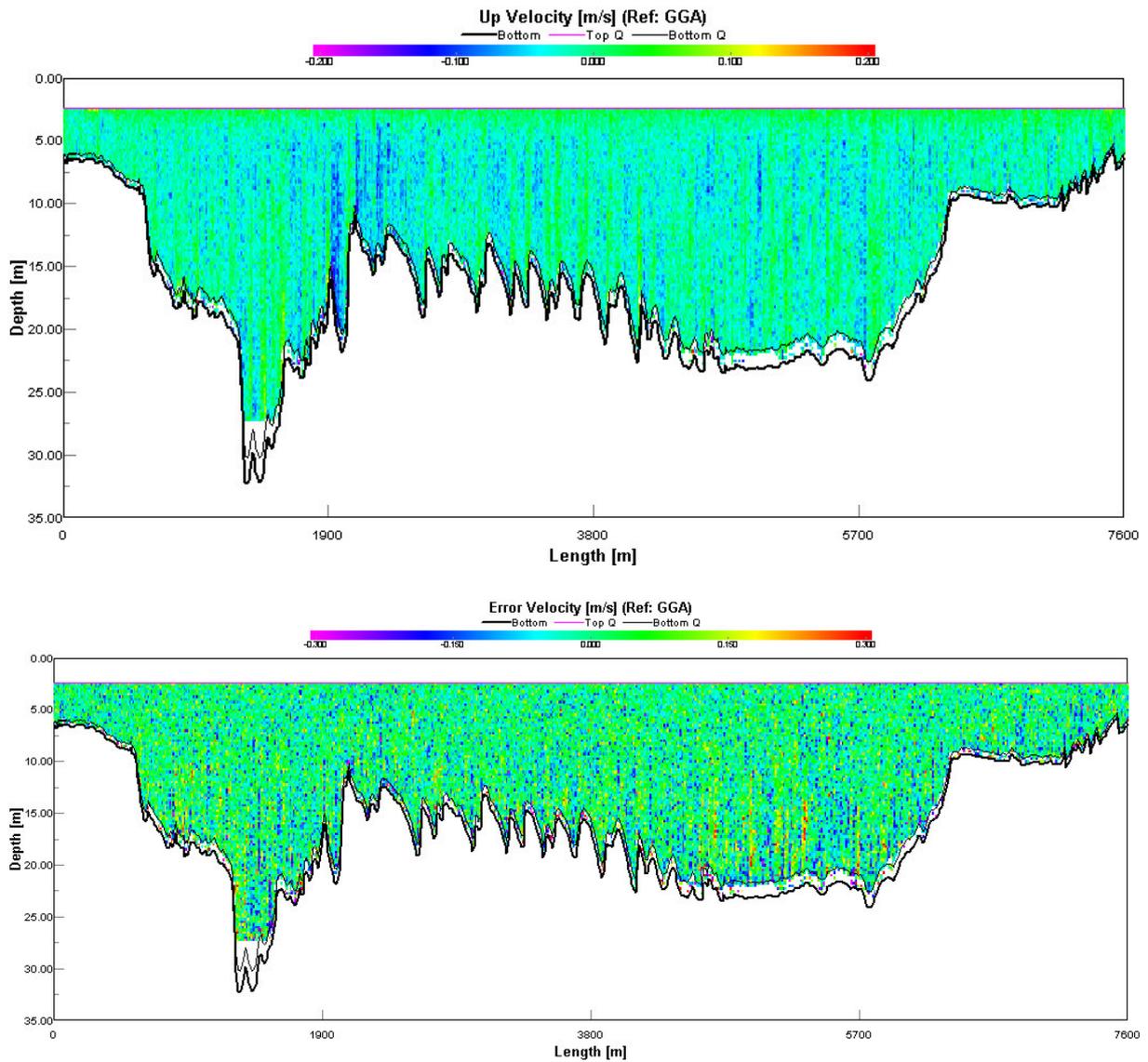


Abb. D3 d-f: vertikale Strömungskomponente und die Error-Velocity aus Messgebiet 1 Lister Tief. Profilnr. 178 vom 23.05.2007. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

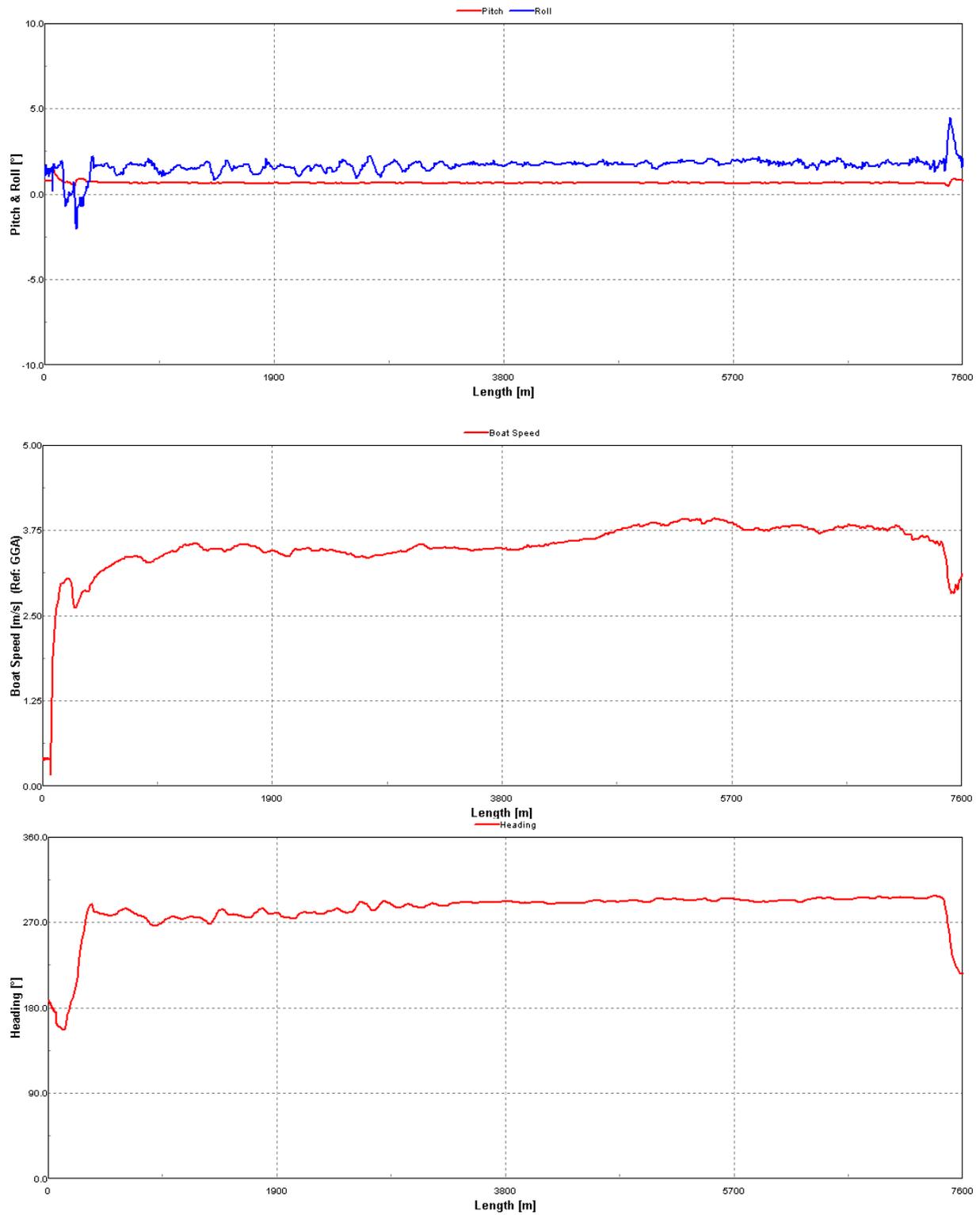


Abb. D3 g-i: Roll und Stampfwinkel, Schiffsgeschwindigkeit und -kurs aus Messgebiet 1 Lister Tief. Profilnr 178 vom 23.05.2007. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

#### D4: Heinckeprofil 021 vom 09.09.2008 aus dem Messgebiet 2 westlich vor Helgoland

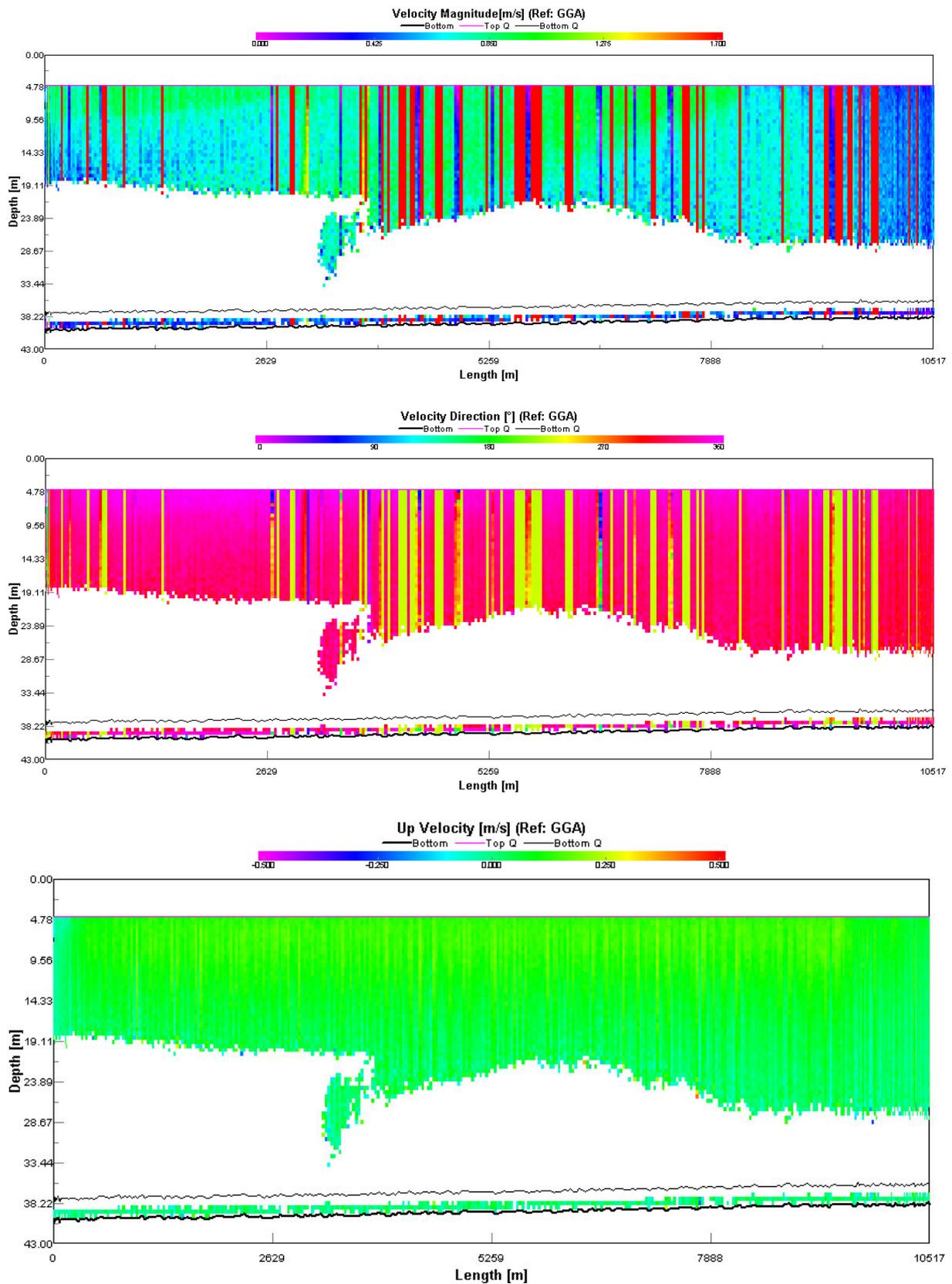


Abb. D4 a-c: Horizontaler Betrag sowie horizontale Richtung und die vertikale Strömungskomponente aus dem Messgebiet 2 westlich vor Helgoland. Profilnr. 021 vom 09.09.2008. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

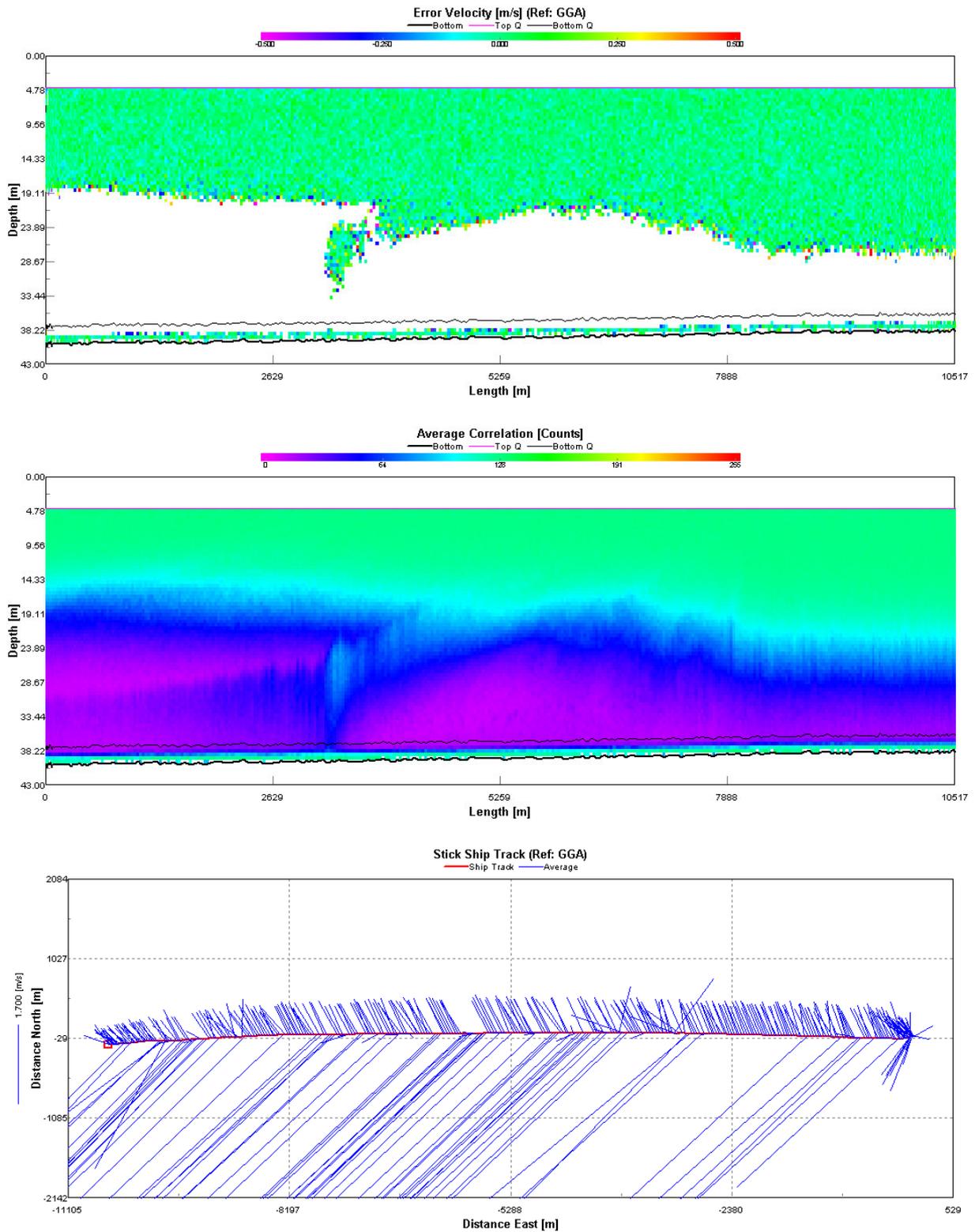


Abb. D4 d-f: Error-velocity, Echointensität und gemittelte Strömung aus dem Messgebiet 2 westlich vor Helgoland. Profilnr. 021 vom 09.09.2008. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

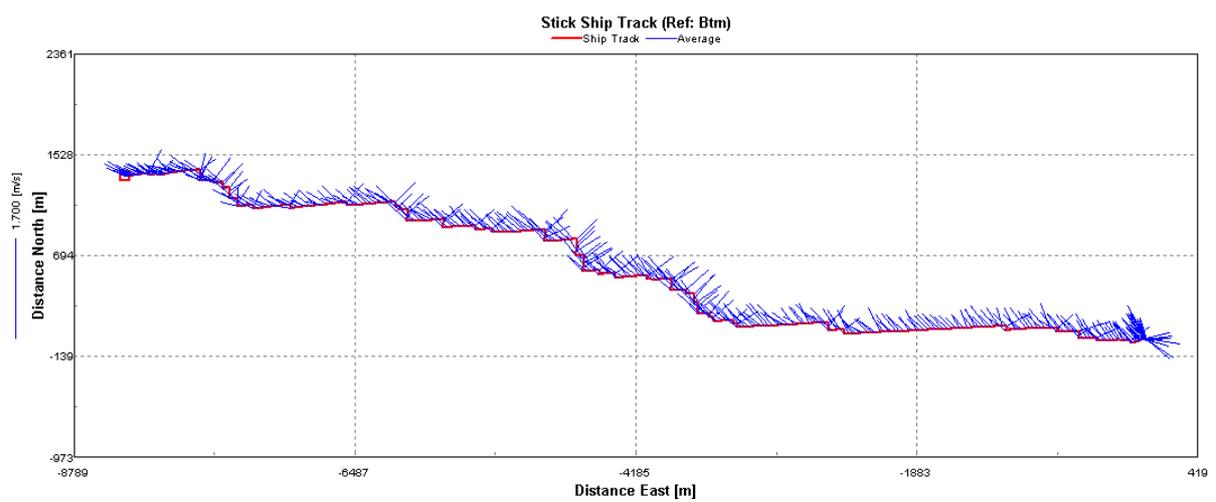
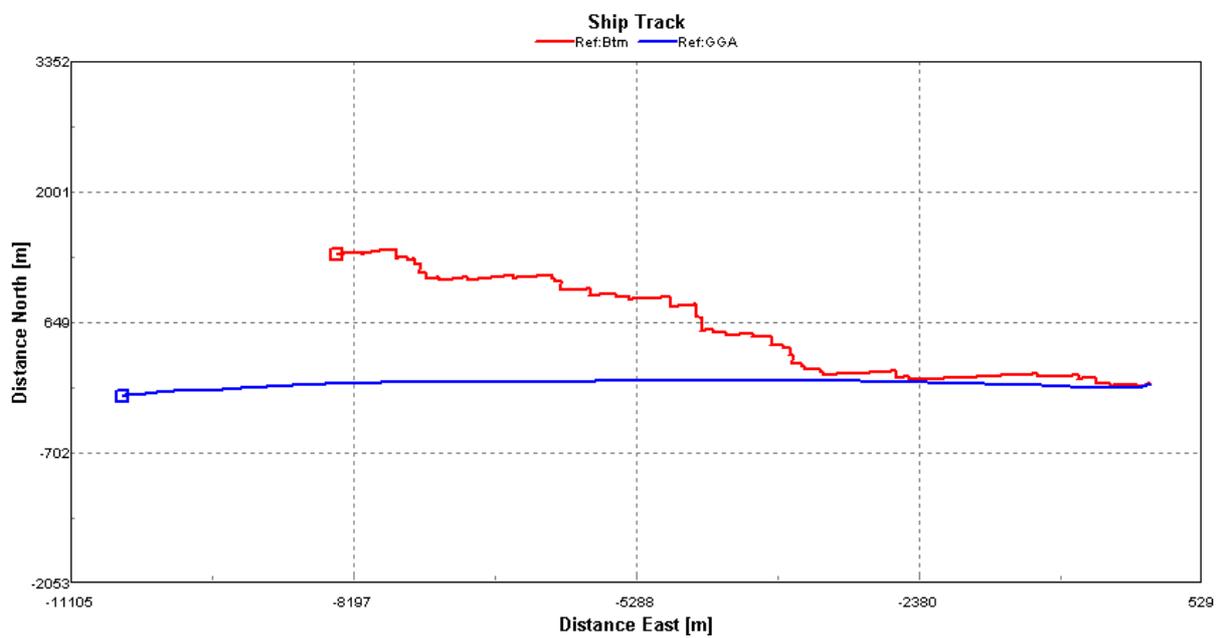
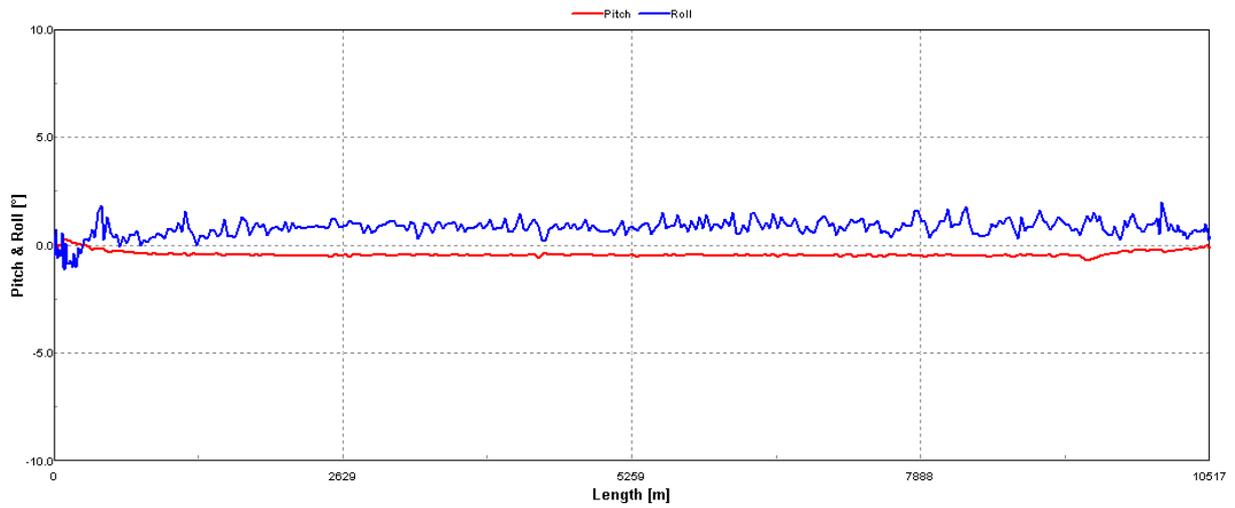


Abb. D4 g-i: Roll und Stampfwinkel, Comboshiptrack, gemittelte Strömung aus dem Messgebiet 2 westlich vor Helgoland. Profilnr. 021 vom 09.09.2008.  
Schnappschuss aus dem Programm WinRiver

**D5: Heinckeprofil 140 vom 23.09.2009 aus dem Messgebiet 2 zwischen Helgoland und Wesermündung**

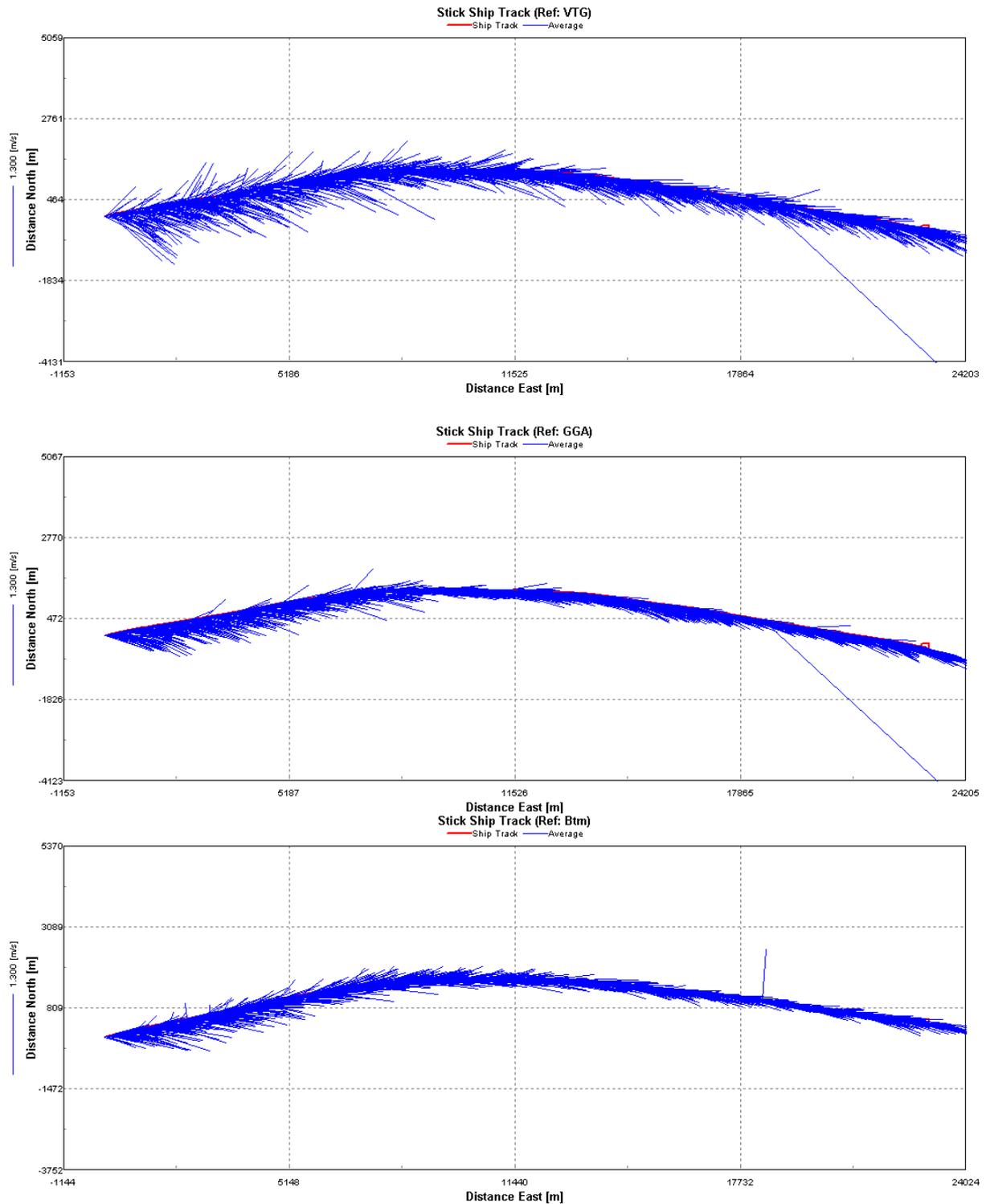


Abb. D5 a-c: gemittelte Strömung referenziert über GPS-VTG, GPS-GGA und BTM aus dem Messgebiet 2 zwischen Helgoland und Wesermündung Profilnr. 140 vom 23.09.2009. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

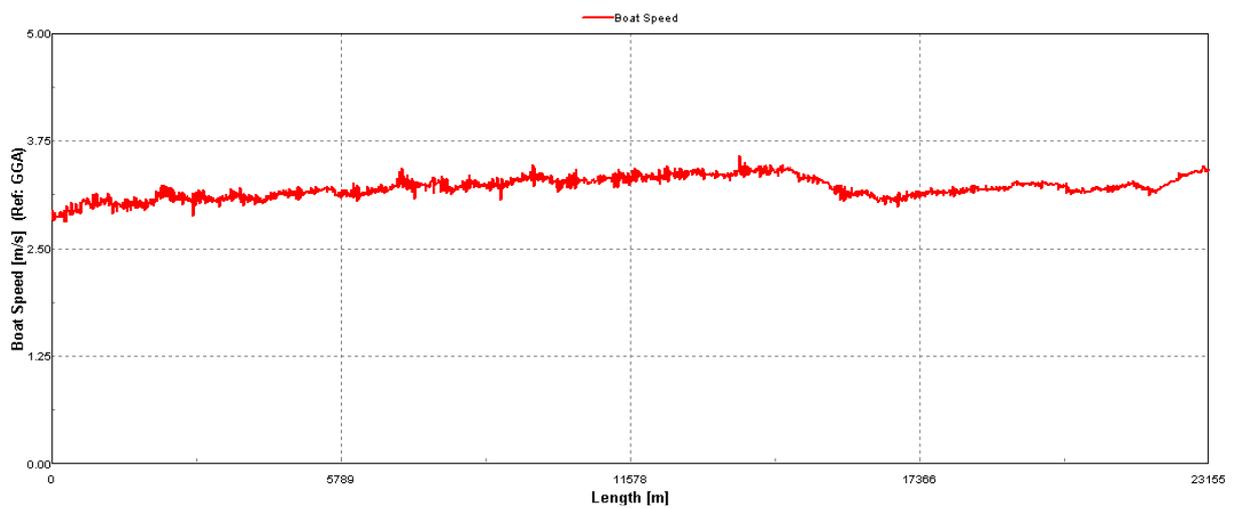
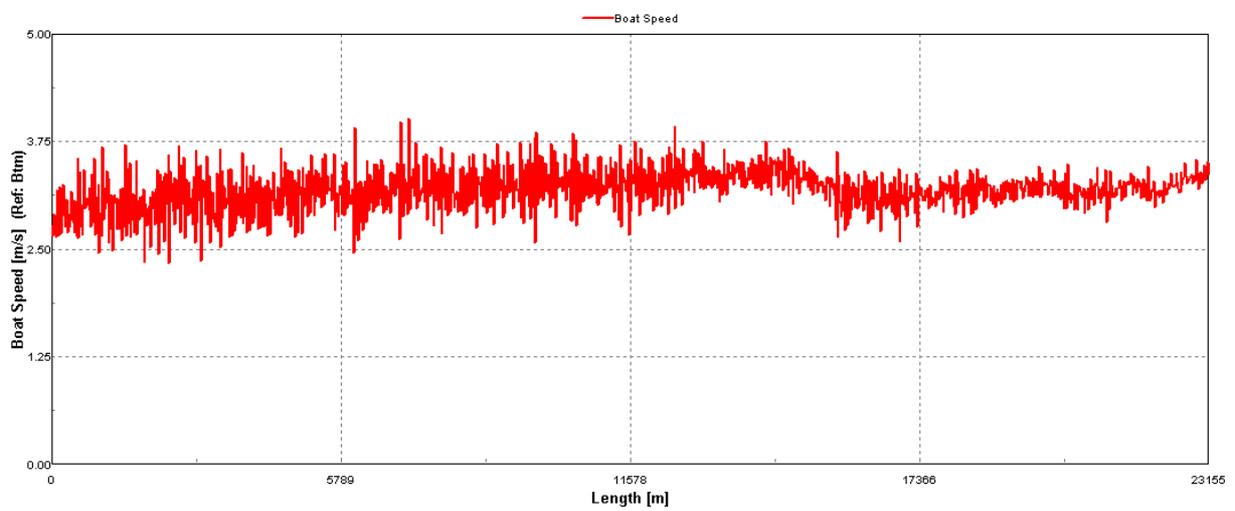
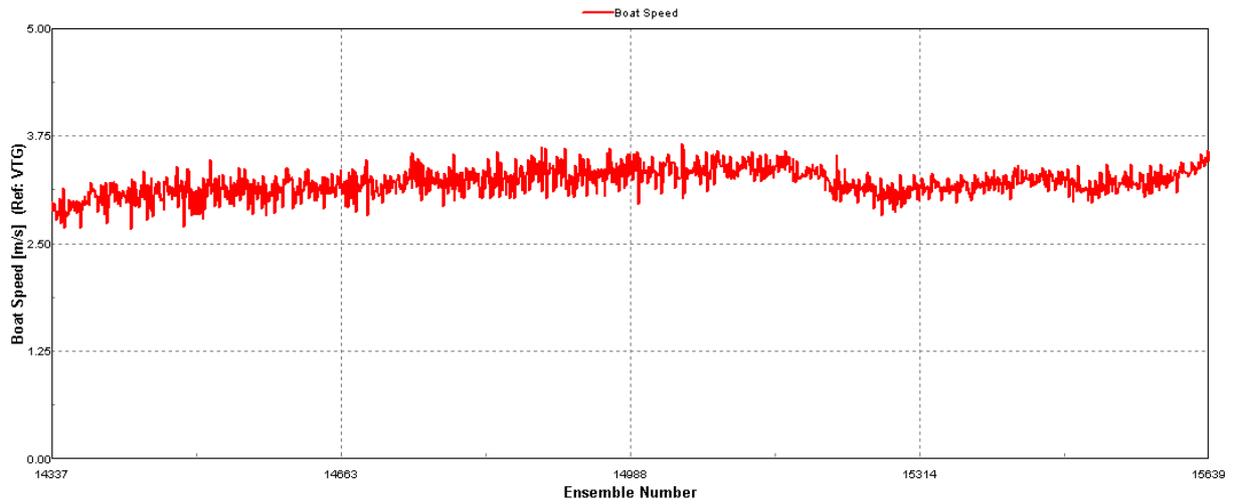


Abb. D5 d-f: Schiffsgeschwindigkeiten ermittelt aus GPS-VTG, GPS-GGA und BTM aus dem Messgebiet 2 zwischen Helgoland und Wesermündung Profilnr. 140 vom 23.09.2009. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

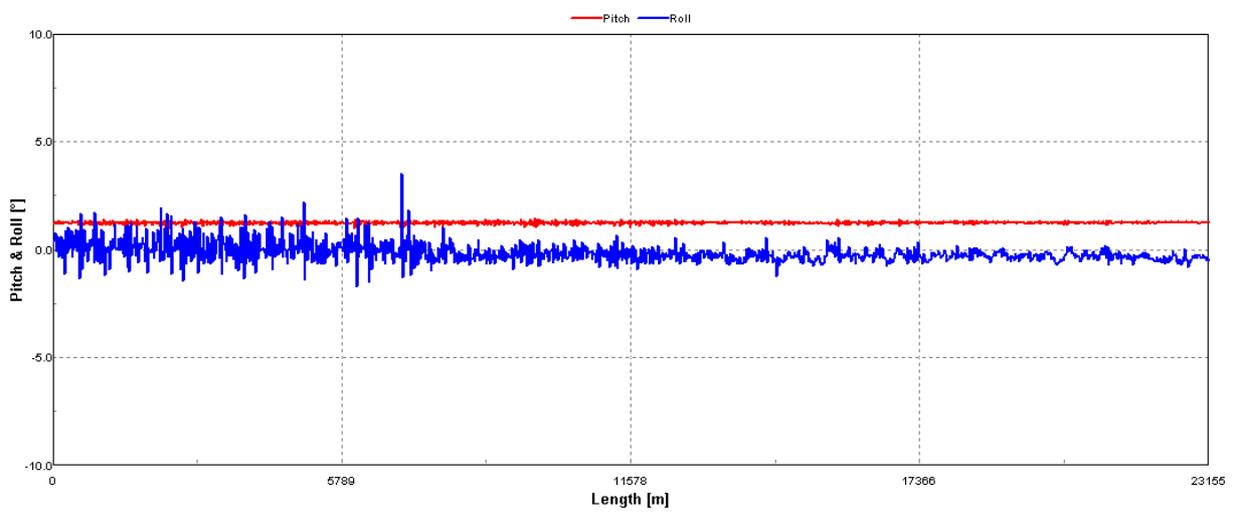
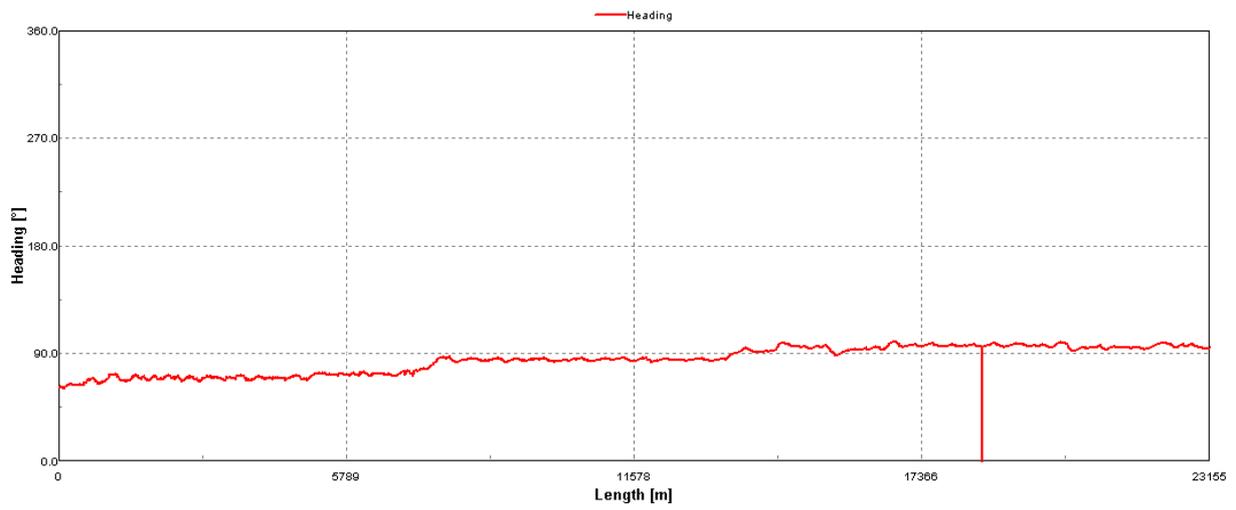


Abb. D5 g-h: Schiffskurs sowie Roll und Stampfwinkel während der Profilfahrt 140 vom 23.09.2009 aus dem Messgebiet 2 zwischen Helgoland und Wesermündung. Schnappschuss aus dem Programm WinRiver.

D6: Prandtlprofil 041 vom 06.06.2010 erhoben im Messgebiet 3 der Elbmündung

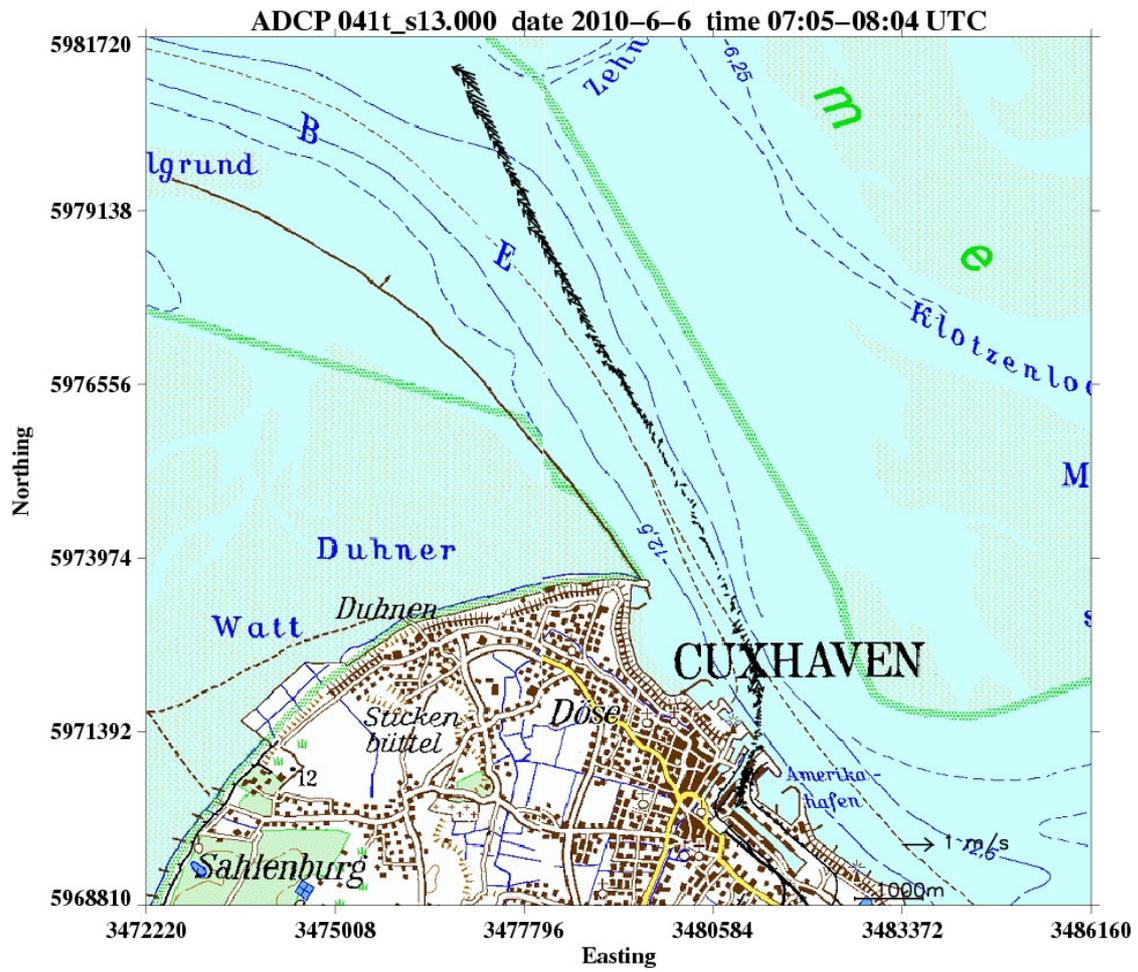


Abb. D6: Lage des Prandtlprofils 041 vom 06.06.2010 erhoben im Messgebiet 3 der Elbmündung

## ANHANG E: Schallgeschwindigkeitstabelle

Saltz/Temp	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0
0.0	1421.3	1425.7	1430.1	1434.4	1438.6	1442.6	1446.6	1450.5	1454.3	1458.0	1461.6	1465.2	1468.6	1472.0	1475.3	1478.5	1481.6	1484.7
1.0	1422.6	1427.0	1431.4	1435.7	1439.8	1443.9	1447.9	1451.7	1455.5	1459.2	1462.8	1466.4	1469.8	1473.2	1476.5	1479.7	1482.8	1485.8
2.0	1423.9	1428.3	1432.7	1436.9	1441.1	1445.1	1449.1	1453.0	1456.7	1460.4	1464.0	1467.6	1471.0	1474.3	1477.6	1480.8	1483.9	1487.0
3.0	1425.2	1429.6	1433.9	1438.2	1442.3	1446.4	1450.3	1454.2	1458.0	1461.6	1465.2	1468.8	1472.2	1475.5	1478.8	1482.0	1485.1	1488.1
4.0	1426.5	1430.9	1435.2	1439.5	1443.6	1447.6	1451.6	1455.4	1459.2	1462.9	1466.4	1469.9	1473.4	1476.7	1479.9	1483.1	1486.2	1489.2
5.0	1427.8	1432.2	1436.5	1440.7	1444.9	1448.9	1452.8	1456.7	1460.4	1464.1	1467.6	1471.1	1474.5	1477.9	1481.1	1484.3	1487.3	1490.4
6.0	1429.1	1433.5	1437.8	1442.0	1446.1	1450.1	1454.1	1457.9	1461.6	1465.3	1468.8	1472.3	1475.7	1479.0	1482.3	1485.4	1488.5	1491.5
7.0	1430.4	1434.8	1439.1	1443.3	1447.4	1451.4	1455.3	1459.1	1462.8	1466.5	1470.0	1473.5	1476.9	1480.2	1483.4	1486.6	1489.6	1492.6
8.0	1431.7	1436.1	1440.3	1444.5	1448.6	1452.6	1456.5	1460.3	1464.1	1467.7	1471.2	1474.7	1478.1	1481.4	1484.6	1487.7	1490.8	1493.7
9.0	1433.0	1437.3	1441.6	1445.8	1449.9	1453.9	1457.8	1461.6	1465.3	1468.9	1472.4	1475.9	1479.3	1482.5	1485.7	1488.9	1491.9	1494.9
10.0	1434.3	1438.6	1442.9	1447.1	1451.2	1455.1	1459.0	1462.8	1466.5	1470.1	1473.6	1477.1	1480.4	1483.7	1486.9	1490.0	1493.0	1496.0
11.0	1435.6	1439.9	1444.2	1448.4	1452.4	1456.4	1460.3	1464.0	1467.7	1471.3	1474.8	1478.3	1481.6	1484.9	1488.1	1491.2	1494.2	1497.1
12.0	1436.9	1441.2	1445.5	1449.6	1453.7	1457.6	1461.5	1465.3	1469.0	1472.5	1476.0	1479.5	1482.8	1486.0	1489.2	1492.3	1495.3	1498.3
13.0	1438.2	1442.5	1446.7	1450.9	1454.9	1458.9	1462.7	1466.5	1470.2	1473.7	1477.2	1480.7	1484.0	1487.2	1490.4	1493.5	1496.5	1499.4
14.0	1439.5	1443.8	1448.0	1452.2	1456.2	1460.1	1464.0	1467.7	1471.4	1475.0	1478.4	1481.8	1485.2	1488.4	1491.5	1494.6	1497.6	1500.5
15.0	1440.8	1445.1	1449.3	1453.4	1457.5	1461.4	1465.2	1469.0	1472.6	1476.2	1479.6	1483.0	1486.3	1489.6	1492.7	1495.8	1498.7	1501.7
16.0	1442.1	1446.4	1450.6	1454.7	1458.7	1462.6	1466.5	1470.2	1473.8	1477.4	1480.8	1484.2	1487.5	1490.7	1493.9	1496.9	1499.9	1502.8
17.0	1443.4	1447.7	1451.9	1456.0	1460.0	1463.9	1467.7	1471.4	1475.0	1478.6	1482.0	1485.4	1488.7	1491.9	1495.0	1498.1	1501.0	1503.9
18.0	1444.7	1449.0	1453.1	1457.2	1461.2	1465.1	1468.9	1472.6	1476.3	1479.8	1483.2	1486.6	1489.9	1493.1	1496.2	1499.2	1502.2	1505.0
19.0	1446.0	1450.2	1454.4	1458.5	1462.5	1466.4	1470.2	1473.9	1477.5	1481.0	1484.4	1487.8	1491.1	1494.2	1497.3	1500.4	1503.3	1506.2
20.0	1447.3	1451.5	1455.7	1459.8	1463.8	1467.6	1471.4	1475.1	1478.7	1482.2	1485.6	1489.0	1492.2	1495.4	1498.5	1501.5	1504.4	1507.3
21.0	1448.6	1452.8	1457.0	1461.1	1465.0	1468.9	1472.7	1476.3	1479.9	1483.4	1486.8	1490.2	1493.4	1496.6	1499.7	1502.7	1505.6	1508.4
22.0	1449.9	1454.1	1458.3	1462.3	1466.3	1470.1	1473.9	1477.6	1481.1	1484.6	1488.0	1491.4	1494.6	1497.7	1500.8	1503.8	1506.7	1509.6
23.0	1451.2	1455.4	1459.5	1463.6	1467.5	1471.4	1475.1	1478.8	1482.4	1485.8	1489.2	1492.6	1495.8	1498.9	1502.0	1505.0	1507.9	1510.7
24.0	1452.5	1456.7	1460.8	1464.9	1468.8	1472.6	1476.4	1480.0	1483.6	1487.1	1490.4	1493.7	1497.0	1500.1	1503.1	1506.1	1509.0	1511.8
25.0	1453.8	1458.0	1462.1	1466.1	1470.1	1473.9	1477.6	1481.3	1484.8	1488.3	1491.6	1494.9	1498.1	1501.3	1504.3	1507.3	1510.1	1513.0
26.0	1455.1	1459.3	1463.4	1467.4	1471.3	1475.1	1478.9	1482.5	1486.0	1489.5	1492.8	1496.1	1499.3	1502.4	1505.5	1508.4	1511.3	1514.1
27.0	1456.4	1460.6	1464.7	1468.7	1472.6	1476.4	1480.1	1483.7	1487.2	1490.7	1494.0	1497.3	1500.5	1503.6	1506.6	1509.6	1512.4	1515.2
28.0	1457.7	1461.9	1466.0	1469.9	1473.8	1477.6	1481.3	1484.9	1488.5	1491.9	1495.2	1498.5	1501.7	1504.8	1507.8	1510.7	1513.6	1516.3
29.0	1459.0	1463.1	1467.2	1471.2	1475.1	1478.9	1482.6	1486.2	1489.7	1493.1	1496.4	1499.7	1502.9	1505.9	1508.9	1511.9	1514.7	1517.5
30.0	1460.3	1464.4	1468.5	1472.5	1476.4	1480.1	1483.8	1487.4	1490.9	1494.3	1497.6	1500.9	1504.0	1507.1	1510.1	1513.0	1515.8	1518.6
31.0	1461.6	1465.7	1469.8	1473.8	1477.6	1481.4	1485.1	1488.6	1492.1	1495.5	1498.8	1502.1	1505.2	1508.3	1511.3	1514.2	1517.0	1519.7
32.0	1462.9	1467.0	1471.1	1475.0	1478.9	1482.6	1486.3	1489.9	1493.3	1496.7	1500.0	1503.3	1506.4	1509.4	1512.4	1515.3	1518.1	1520.9
33.0	1464.2	1468.3	1472.3	1476.3	1480.1	1483.9	1487.5	1491.1	1494.6	1497.9	1501.2	1504.5	1507.6	1510.6	1513.6	1516.5	1519.3	1522.0
34.0	1465.5	1469.6	1473.6	1477.6	1481.4	1485.1	1488.8	1492.3	1495.8	1499.2	1502.4	1505.6	1508.8	1511.8	1514.7	1517.6	1520.4	1523.1
35.0	1466.8	1470.9	1474.9	1478.8	1482.7	1486.4	1490.0	1493.6	1497.0	1500.4	1503.6	1506.8	1509.9	1513.0	1515.9	1518.8	1521.5	1524.3

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

Tiefe in [m]	Vcorr in [m/s]
0.0	0.0
10.0	0.2
20.0	0.3
30.0	0.5
40.0	0.6
60.0	1.0

## ANHANG F: CTD-Messung

### F1. CTD-Messung aus dem Messgebiet Lister Tief vom 16.07.2002

SSDA Sea & Sun Technology's Standard Data Acquisition software package rev 1.56 16.07.2002  
 D:\MAI2006\DATA\CTD\LISTTIEF2006\SAVING\_CTD\_PROG\CONFIG\ECO158.SPJ  
 Freitag, 12. Mai 2006 09:07:44

StandardDataAcquisition SSDA (C)copyright by SST 1999-2001

```
001 ECO158 001 N Bott _ 3.2768000000E+0004 1.0000000000E+0000 0.0000000000E+0000 0.0000000000E+0000
0.0000000000E+0000 0.0000000000E+0000
001 ECO158 002 N Temp degC 3.4953500000E+0002 1.1547100000E-0002 2.4800500000E-0008 0.0000000000E+0000
0.0000000000E+0000 0.0000000000E+0000
001 ECO158 003 N Cond mS/cm 6.7758800000E+0002 2.3875200000E-0002 9.7522500000E-0008 0.0000000000E+0000
0.0000000000E+0000 0.0000000000E+0000
001 ECO158 004 P Press dbar 9.5521120000E+0002 3.2302920000E-0002 9.0863220000E-0008 0.0000000000E+0000
0.0000000000E+0000 0.0000000000E+0000
001 ECO158 005 N Trans % 1.1228700000E+0003 3.4494700000E-0002 0.0000000000E+0000 0.0000000000E+0000
0.0000000000E+0000 0.0000000000E+0000
```

D:\mai2006\data\ctd\listtief2006\060512\Q5120907.SRD

Lines : 910

```

;
; Datasets Press Temp Cond Trans BOTT CAP25 SALIN SIGMA SOUND IntDT IntDT
; [ dbar] [ degC] [ mS/cm] [ %] [ _] [ mS/cm] [ ppt] [ kg/m3] [ m/s] [ Time] [ Time]
;
139 0.3 14.82 36.05 104.1 0 45.265 28.955 21.356 1499.06 09:08:20 12.05.2?
140 0.3 14.82 36.09 103.7 0 45.310 28.987 21.381 1499.10 09:08:21 12.05.2?
141 0.3 14.82 36.03 103.6 0 45.243 28.939 21.344 1499.04 09:08:21 12.05.2?
142 0.3 14.82 36.05 104.1 0 45.265 28.955 21.356 1499.06 09:08:21 12.05.2?
143 0.3 14.82 36.05 104.1 0 45.265 28.955 21.356 1499.06 09:08:21 12.05.2?
144 0.3 14.82 36.05 104.1 0 45.265 28.955 21.356 1499.06 09:08:22 12.05.2?
145 0.3 14.82 36.05 104.0 0 45.265 28.955 21.357 1499.06 09:08:22 12.05.2?
146 0.4 14.82 36.03 103.8 0 45.243 28.939 21.344 1499.05 09:08:22 12.05.2?
147 0.4 14.82 36.01 103.9 0 45.220 28.923 21.332 1499.03 09:08:22 12.05.2?
148 0.4 14.82 36.03 104.1 0 45.243 28.939 21.344 1499.05 09:08:23 12.05.2?
149 0.4 14.82 36.03 104.0 0 45.243 28.939 21.344 1499.05 09:08:23 12.05.2?
150 0.4 14.82 36.05 103.9 0 45.265 28.955 21.357 1499.06 09:08:23 12.05.2?
151 0.4 14.82 36.01 104.0 0 45.220 28.923 21.332 1499.03 09:08:23 12.05.2?
152 0.3 14.82 36.05 103.8 0 45.265 28.955 21.356 1499.06 09:08:24 12.05.2?
153 0.4 14.82 36.09 103.7 0 45.310 28.987 21.381 1499.10 09:08:24 12.05.2?
154 0.4 14.80 36.05 103.8 0 45.288 28.970 21.373 1499.02 09:08:24 12.05.2?
155 0.5 14.80 36.05 103.9 0 45.288 28.970 21.373 1499.02 09:08:24 12.05.2?
156 0.6 14.80 36.05 103.2 0 45.288 28.970 21.373 1499.02 09:08:25 12.05.2?
157 0.7 14.82 36.05 103.8 0 45.265 28.955 21.358 1499.07 09:08:25 12.05.2?
158 0.8 14.82 36.09 103.7 0 45.310 28.987 21.383 1499.11 09:08:25 12.05.2?
159 0.9 14.82 36.05 103.6 0 45.265 28.955 21.359 1499.07 09:08:26 12.05.2?
160 0.9 14.82 36.09 103.2 0 45.310 28.987 21.384 1499.11 09:08:26 12.05.2?
161 1.1 14.82 36.09 103.2 0 45.310 28.987 21.384 1499.11 09:08:26 12.05.2?
162 1.1 14.82 36.09 103.7 0 45.310 28.987 21.384 1499.11 09:08:26 12.05.2?
163 1.2 14.82 36.09 103.7 0 45.310 28.987 21.385 1499.11 09:08:27 12.05.2?
164 1.3 14.84 36.05 103.8 0 45.243 28.940 21.345 1499.13 09:08:27 12.05.2?
165 1.4 14.82 36.05 103.8 0 45.265 28.955 21.361 1499.08 09:08:27 12.05.2?
166 1.5 14.82 36.01 103.5 0 45.220 28.923 21.337 1499.04 09:08:27 12.05.2?
167 1.5 14.80 36.01 103.4 0 45.243 28.938 21.353 1499.00 09:08:28 12.05.2?
168 1.6 14.80 36.00 103.3 0 45.221 28.922 21.341 1498.98 09:08:28 12.05.2?
169 1.7 14.78 35.94 103.1 0 45.176 28.889 21.320 1498.88 09:08:28 12.05.2?
170 1.8 14.70 35.91 103.6 0 45.222 28.916 21.358 1498.65 09:08:28 12.05.2?
171 1.9 14.64 35.85 103.1 0 45.223 28.913 21.368 1498.46 09:08:29 12.05.2?
172 2.1 14.60 35.84 102.4 0 45.246 28.926 21.387 1498.34 09:08:29 12.05.2?
173 2.2 14.56 35.84 102.3 0 45.292 28.956 21.419 1498.25 09:08:29 12.05.2?
174 2.3 14.54 35.84 102.4 0 45.315 28.971 21.435 1498.21 09:08:29 12.05.2?
175 2.4 14.52 35.84 102.4 0 45.338 28.986 21.451 1498.16 09:08:30 12.05.2?
176 2.5 14.50 35.80 102.9 0 45.315 28.969 21.443 1498.08 09:08:30 12.05.2?
177 2.6 14.48 35.78 102.3 0 45.316 28.967 21.446 1498.01 09:08:30 12.05.2?
178 2.8 14.46 35.80 103.0 0 45.361 28.998 21.475 1497.98 09:08:30 12.05.2?
179 2.9 14.46 35.80 102.7 0 45.361 28.998 21.475 1497.99 09:08:31 12.05.2?
180 3.1 14.48 35.80 102.8 0 45.338 28.983 21.460 1498.04 09:08:31 12.05.2?
181 3.2 14.48 35.80 101.9 0 45.338 28.983 21.461 1498.04 09:08:31 12.05.2?
182 3.3 14.46 35.80 102.9 0 45.361 28.998 21.477 1497.99 09:08:32 12.05.2?
183 3.4 14.46 35.80 102.6 0 45.361 28.998 21.477 1497.99 09:08:32 12.05.2?
184 3.4 14.44 35.76 102.0 0 45.339 28.981 21.468 1497.91 09:08:32 12.05.2?
185 3.5 14.36 35.73 101.2 0 45.386 29.009 21.506 1497.68 09:08:32 12.05.2?
186 3.5 14.32 35.73 102.8 0 45.432 29.039 21.538 1497.59 09:08:33 12.05.2?

```

187	3.6	14.32	35.69	103.5	0	45.387	29.006	21.513	1497.55	09:08:33	12.05.2?
188	3.7	14.30	35.69	103.0	0	45.410	29.021	21.529	1497.50	09:08:33	12.05.2?
189	3.8	14.30	35.67	103.9	0	45.387	29.005	21.517	1497.49	09:08:33	12.05.2?
190	4.0	14.28	35.67	102.2	0	45.410	29.020	21.533	1497.44	09:08:34	12.05.2?
191	4.2	14.30	35.71	103.4	0	45.432	29.037	21.543	1497.53	09:08:34	12.05.2?
192	4.4	14.32	35.69	103.4	0	45.387	29.006	21.516	1497.56	09:08:34	12.05.2?
193	4.5	14.32	35.71	103.4	0	45.409	29.022	21.529	1497.58	09:08:34	12.05.2?
194	4.5	14.32	35.75	103.7	0	45.455	29.054	21.554	1497.62	09:08:35	12.05.2?
195	4.6	14.32	35.80	102.8	0	45.523	29.103	21.592	1497.68	09:08:35	12.05.2?
196	4.7	14.34	35.76	104.3	0	45.454	29.055	21.552	1497.69	09:08:35	12.05.2?
197	4.8	14.36	35.75	103.7	0	45.409	29.024	21.524	1497.72	09:08:35	12.05.2?
198	4.9	14.36	35.75	102.4	0	45.409	29.024	21.524	1497.72	09:08:36	12.05.2?
199	5.0	14.36	35.75	103.6	0	45.409	29.024	21.525	1497.72	09:08:36	12.05.2?
200	5.1	14.36	35.73	103.2	0	45.386	29.008	21.513	1497.71	09:08:36	12.05.2?
201	5.2	14.36	35.73	103.7	0	45.386	29.008	21.513	1497.71	09:08:37	12.05.2?
202	5.2	14.36	35.73	103.3	0	45.386	29.008	21.514	1497.71	09:08:37	12.05.2?
203	5.3	14.36	35.76	103.5	0	45.431	29.040	21.539	1497.75	09:08:37	12.05.2?
204	5.5	14.36	35.73	103.4	0	45.386	29.008	21.515	1497.71	09:08:37	12.05.2?
205	5.7	14.36	35.71	102.7	0	45.363	28.992	21.503	1497.70	09:08:38	12.05.2?
206	5.9	14.34	35.73	103.8	0	45.409	29.023	21.532	1497.67	09:08:38	12.05.2?
207	6.0	14.32	35.69	103.8	0	45.387	29.006	21.523	1497.59	09:08:38	12.05.2?
208	6.2	14.30	35.69	103.4	0	45.410	29.020	21.539	1497.54	09:08:38	12.05.2?
209	6.4	14.30	35.69	103.8	0	45.410	29.020	21.540	1497.55	09:08:39	12.05.2?
210	6.5	14.30	35.69	103.3	0	45.410	29.020	21.541	1497.55	09:08:39	12.05.2?
211	6.8	14.30	35.69	103.2	0	45.410	29.020	21.542	1497.55	09:08:39	12.05.2?
212	7.0	14.28	35.69	103.2	0	45.433	29.035	21.558	1497.51	09:08:39	12.05.2?
213	7.2	14.28	35.69	104.0	0	45.433	29.035	21.559	1497.51	09:08:40	12.05.2?
214	7.4	14.28	35.69	103.5	0	45.433	29.035	21.560	1497.51	09:08:40	12.05.2?
215	7.6	14.28	35.67	102.8	0	45.410	29.019	21.549	1497.50	09:08:40	12.05.2?
216	7.8	14.28	35.69	103.6	0	45.433	29.035	21.562	1497.52	09:08:40	12.05.2?
217	7.9	14.28	35.71	102.8	0	45.456	29.051	21.575	1497.54	09:08:41	12.05.2?
218	8.0	14.28	35.71	103.5	0	45.456	29.051	21.575	1497.54	09:08:41	12.05.2?
219	8.1	14.28	35.71	102.8	0	45.456	29.051	21.575	1497.54	09:08:41	12.05.2?
220	8.1	14.28	35.73	103.0	0	45.478	29.067	21.588	1497.56	09:08:41	12.05.2?
221	8.2	14.28	35.69	104.2	0	45.433	29.035	21.564	1497.53	09:08:42	12.05.2?
222	8.4	14.28	35.69	103.0	0	45.433	29.035	21.565	1497.53	09:08:42	12.05.2?
223	8.5	14.28	35.71	103.2	0	45.456	29.051	21.577	1497.55	09:08:42	12.05.2?
224	8.7	14.28	35.69	103.3	0	45.433	29.035	21.566	1497.53	09:08:42	12.05.2?
225	8.8	14.28	35.71	103.8	0	45.456	29.051	21.579	1497.56	09:08:43	12.05.2?
226	8.8	14.28	35.71	102.6	0	45.456	29.051	21.579	1497.56	09:08:43	12.05.2?
227	8.9	14.28	35.71	103.7	0	45.456	29.051	21.579	1497.56	09:08:43	12.05.2?
228	9.1	14.28	35.69	103.4	0	45.433	29.034	21.567	1497.54	09:08:44	12.05.2?
229	9.3	14.26	35.69	103.1	0	45.456	29.049	21.584	1497.50	09:08:44	12.05.2?
230	9.5	14.26	35.69	102.2	0	45.456	29.049	21.585	1497.50	09:08:44	12.05.2?
231	9.6	14.28	35.69	102.8	0	45.433	29.034	21.570	1497.55	09:08:44	12.05.2?
232	9.8	14.28	35.69	103.6	0	45.433	29.034	21.570	1497.55	09:08:45	12.05.2?
233	9.9	14.28	35.69	103.7	0	45.433	29.034	21.571	1497.55	09:08:45	12.05.2?
234	10.1	14.28	35.69	103.2	0	45.433	29.034	21.572	1497.56	09:08:45	12.05.2?
235	10.2	14.28	35.69	103.1	0	45.433	29.034	21.572	1497.56	09:08:45	12.05.2?
236	10.4	14.28	35.69	102.3	0	45.433	29.034	21.573	1497.56	09:08:46	12.05.2?
237	10.5	14.28	35.71	103.2	0	45.456	29.050	21.586	1497.58	09:08:46	12.05.2?
238	10.6	14.28	35.71	103.4	0	45.456	29.050	21.586	1497.58	09:08:46	12.05.2?
239	10.7	14.28	35.69	103.4	0	45.433	29.034	21.574	1497.57	09:08:46	12.05.2?
240	10.9	14.28	35.71	103.1	0	45.456	29.050	21.587	1497.59	09:08:47	12.05.2?
241	11.0	14.26	35.69	103.4	0	45.456	29.049	21.591	1497.52	09:08:47	12.05.2?
242	11.2	14.26	35.69	103.4	0	45.456	29.049	21.592	1497.53	09:08:47	12.05.2?
243	11.3	14.26	35.69	103.0	0	45.456	29.049	21.592	1497.53	09:08:48	12.05.2?
244	11.5	14.28	35.69	103.3	0	45.433	29.034	21.578	1497.58	09:08:48	12.05.2?
245	11.7	14.26	35.69	103.2	0	45.456	29.049	21.594	1497.53	09:08:48	12.05.2?
246	11.8	14.26	35.73	103.0	0	45.502	29.081	21.619	1497.57	09:08:48	12.05.2?
247	11.9	14.26	35.73	103.4	0	45.502	29.081	21.620	1497.58	09:08:49	12.05.2?
248	12.1	14.26	35.73	102.8	0	45.502	29.081	21.620	1497.58	09:08:49	12.05.2?
249	12.2	14.28	35.71	103.2	0	45.456	29.049	21.593	1497.61	09:08:49	12.05.2?
250	12.4	14.28	35.71	103.0	0	45.456	29.049	21.594	1497.61	09:08:49	12.05.2?
251	12.5	14.28	35.71	103.1	0	45.456	29.049	21.594	1497.62	09:08:50	12.05.2?
252	12.7	14.28	35.71	103.1	0	45.456	29.049	21.595	1497.62	09:08:50	12.05.2?
253	12.8	14.28	35.71	102.9	0	45.456	29.049	21.596	1497.62	09:08:50	12.05.2?
254	13.0	14.28	35.71	103.7	0	45.456	29.049	21.596	1497.62	09:08:50	12.05.2?
255	13.2	14.28	35.71	103.0	0	45.456	29.049	21.597	1497.63	09:08:51	12.05.2?
256	13.3	14.28	35.71	103.0	0	45.456	29.049	21.597	1497.63	09:08:51	12.05.2?
257	13.3	14.28	35.73	103.0	0	45.478	29.065	21.610	1497.65	09:08:51	12.05.2?
258	13.4	14.26	35.73	103.8	0	45.502	29.080	21.626	1497.60	09:08:51	12.05.2?
259	13.6	14.28	35.71	102.9	0	45.456	29.049	21.599	1497.63	09:08:52	12.05.2?
260	13.7	14.28	35.71	103.3	0	45.456	29.049	21.599	1497.63	09:08:52	12.05.2?
261	13.8	14.26	35.73	102.2	0	45.502	29.080	21.628	1497.61	09:08:52	12.05.2?
262	13.9	14.26	35.73	101.9	0	45.502	29.080	21.628	1497.61	09:08:52	12.05.2?
263	14.1	14.26	35.73	103.4	0	45.502	29.080	21.629	1497.61	09:08:53	12.05.2?

264	14.2	14.26	35.73	103.7	0	45.502	29.080	21.629	1497.61	09:08:53	12.05.2?
265	14.3	14.28	35.71	103.4	0	45.456	29.049	21.602	1497.64	09:08:53	12.05.2?
266	14.4	14.28	35.73	102.6	0	45.478	29.065	21.615	1497.66	09:08:53	12.05.2?
267	14.5	14.28	35.71	102.5	0	45.456	29.049	21.603	1497.65	09:08:54	12.05.2?
268	14.7	14.28	35.71	103.4	0	45.456	29.049	21.603	1497.65	09:08:54	12.05.2?
269	14.8	14.28	35.71	103.9	0	45.456	29.049	21.604	1497.65	09:08:54	12.05.2?
270	14.9	14.28	35.71	102.3	0	45.456	29.049	21.604	1497.65	09:08:54	12.05.2?
271	15.0	14.28	35.71	103.2	0	45.456	29.048	21.605	1497.66	09:08:55	12.05.2?
272	15.1	14.28	35.71	103.3	0	45.456	29.048	21.605	1497.66	09:08:55	12.05.2?
273	15.3	14.28	35.71	102.9	0	45.456	29.048	21.606	1497.66	09:08:55	12.05.2?
274	15.4	14.28	35.71	102.8	0	45.456	29.048	21.606	1497.66	09:08:56	12.05.2?
275	15.5	14.28	35.71	102.9	0	45.456	29.048	21.607	1497.66	09:08:56	12.05.2?
276	15.6	14.28	35.71	102.8	0	45.456	29.048	21.607	1497.67	09:08:56	12.05.2?
277	15.8	14.28	35.71	102.2	0	45.456	29.048	21.608	1497.67	09:08:56	12.05.2?
278	15.9	14.28	35.71	103.0	0	45.456	29.048	21.609	1497.67	09:08:57	12.05.2?
279	16.0	14.28	35.71	102.9	0	45.456	29.048	21.609	1497.67	09:08:57	12.05.2?
280	16.2	14.28	35.71	102.5	0	45.456	29.048	21.610	1497.67	09:08:57	12.05.2?
281	16.4	14.28	35.71	102.2	0	45.456	29.048	21.610	1497.68	09:08:57	12.05.2?
282	16.5	14.28	35.71	102.8	0	45.456	29.048	21.611	1497.68	09:08:58	12.05.2?
283	16.6	14.28	35.71	102.2	0	45.456	29.048	21.611	1497.68	09:08:58	12.05.2?
284	16.7	14.28	35.71	101.8	0	45.456	29.048	21.612	1497.68	09:08:58	12.05.2?
285	16.9	14.28	35.71	102.6	0	45.456	29.048	21.613	1497.69	09:08:59	12.05.2?
286	17.0	14.28	35.71	102.8	0	45.456	29.048	21.613	1497.69	09:08:59	12.05.2?
287	17.2	14.28	35.71	102.6	0	45.456	29.048	21.614	1497.69	09:08:59	12.05.2?
288	17.3	14.28	35.71	102.6	0	45.456	29.048	21.615	1497.69	09:08:59	12.05.2?
289	17.5	14.28	35.71	102.8	0	45.456	29.048	21.615	1497.70	09:09:00	12.05.2?
290	17.6	14.27	35.71	101.8	1	45.467	29.055	21.623	1497.67	09:09:00	12.05.2?
291	17.7	14.27	35.71	101.6	1	45.467	29.055	21.624	1497.67	09:09:00	12.05.2?
292	17.8	14.27	35.71	101.9	1	45.467	29.055	21.624	1497.68	09:09:00	12.05.2?
293	17.8	14.27	35.71	102.7	1	45.467	29.055	21.625	1497.68	09:09:01	12.05.2?
294	17.9	14.27	35.73	103.0	1	45.490	29.071	21.637	1497.70	09:09:01	12.05.2?
295	18.0	14.27	35.71	102.3	1	45.467	29.055	21.625	1497.68	09:09:01	12.05.2?
296	18.1	14.27	35.71	103.0	1	45.467	29.055	21.626	1497.68	09:09:01	12.05.2?
297	18.3	14.27	35.71	102.9	1	45.467	29.055	21.626	1497.68	09:09:02	12.05.2?
298	18.4	14.27	35.71	101.9	1	45.467	29.055	21.627	1497.69	09:09:02	12.05.2?
299	18.4	14.27	35.71	102.2	1	45.467	29.055	21.627	1497.69	09:09:02	12.05.2?
300	18.4	14.27	35.71	102.3	1	45.467	29.055	21.627	1497.69	09:09:02	12.05.2?

**F2. CTD-Messung in der Elbe bei Cuxhaven vom 14.06.2010**  
 (Quelle: BAW-Hamburg Christian Maushacke)

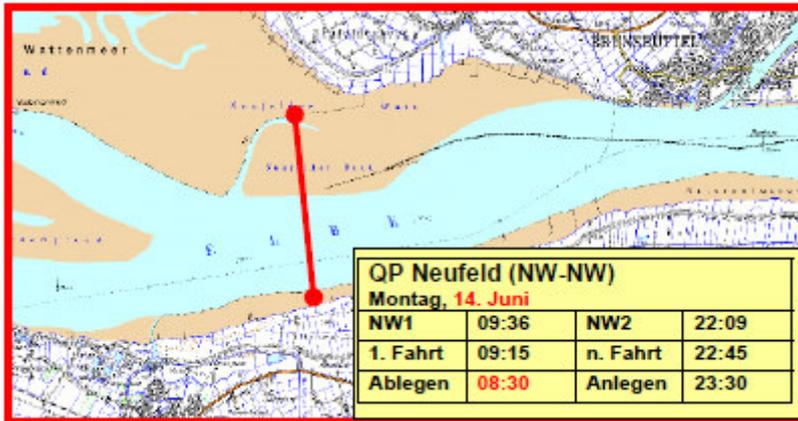


Abb. F1: Lage der CTD-Profilen vor Cuxhaven (BAW-Hamburg)

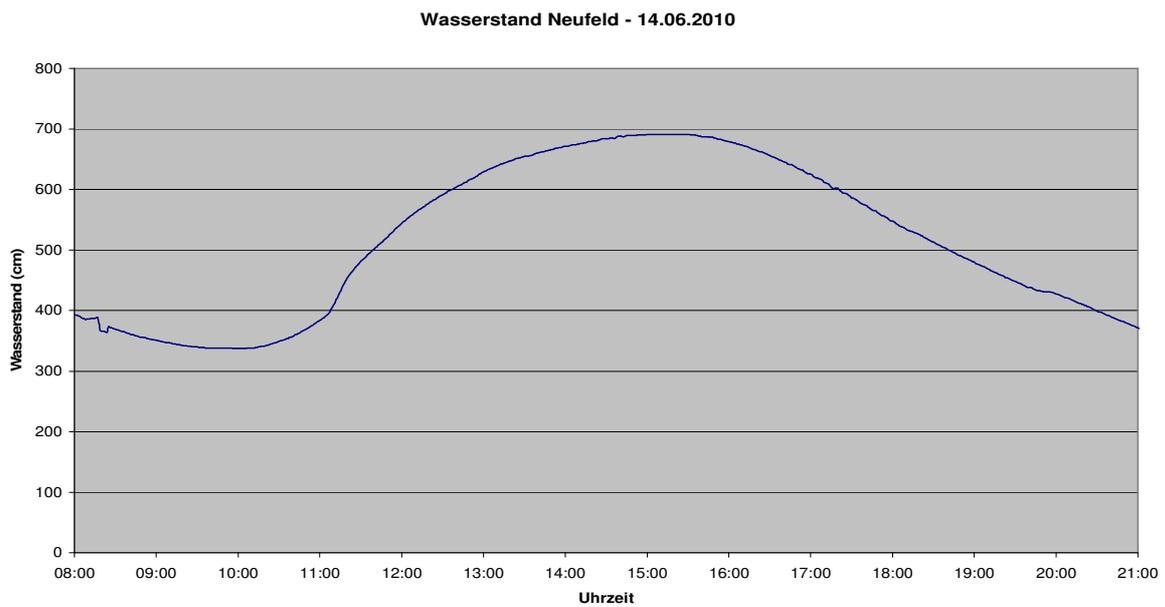


Abb. F2: Wasserstand für das Messgebiet vor Cuxhaven am 14.06.2010 (BAW-Hamburg)

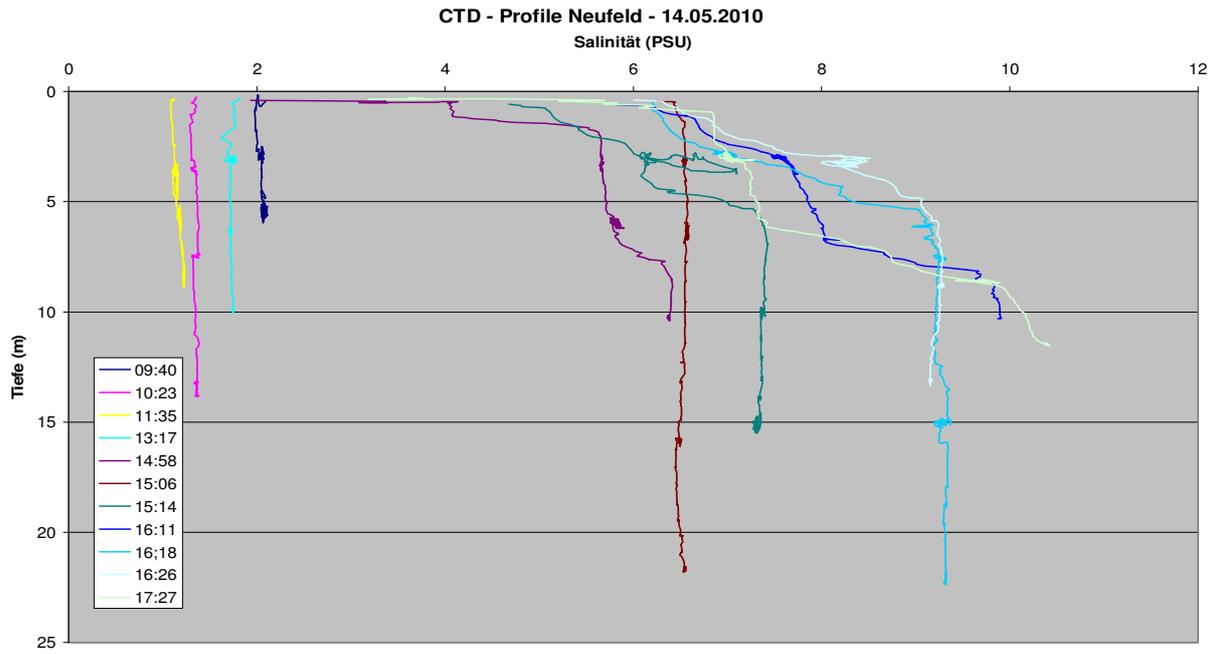


Abb. F3: Salzgehalte zu verschiedenen Tidezeiten für das Messgebiet vor Cuxhaven am 14.06.2010 (BAW-Hamburg)

## Anhang G: Radarströmungskarten

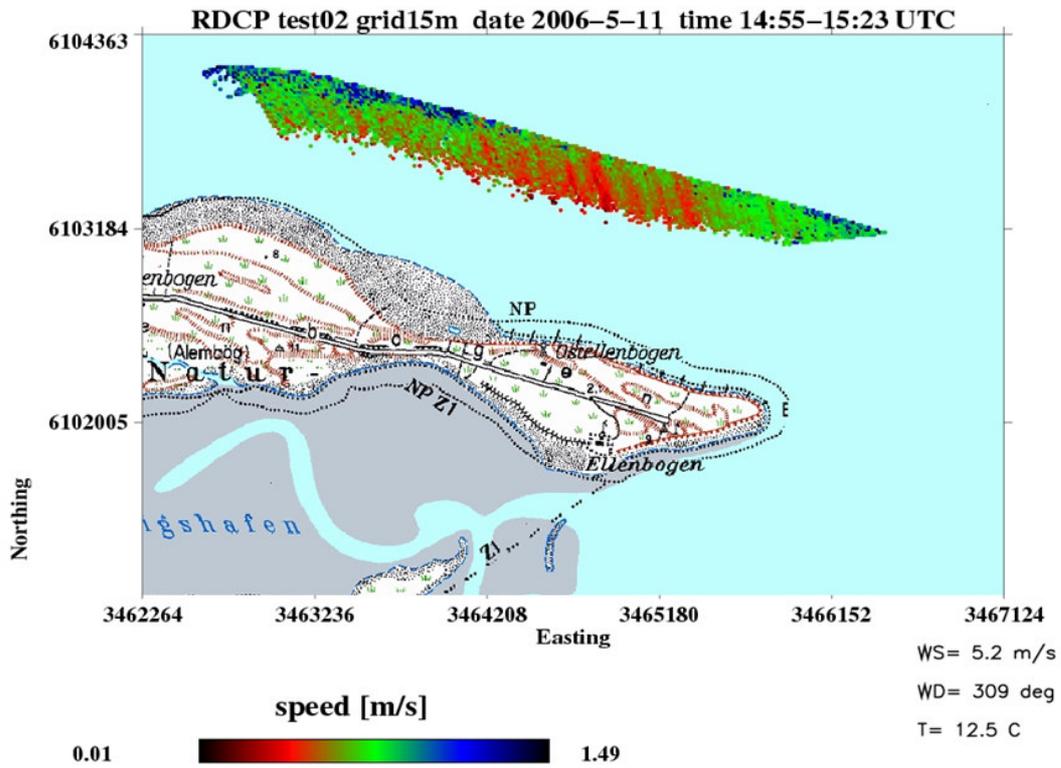


Abb. G1: Betrag der Oberflächenströmung erfasst mit RDCP im Messgebiet Lister Tief

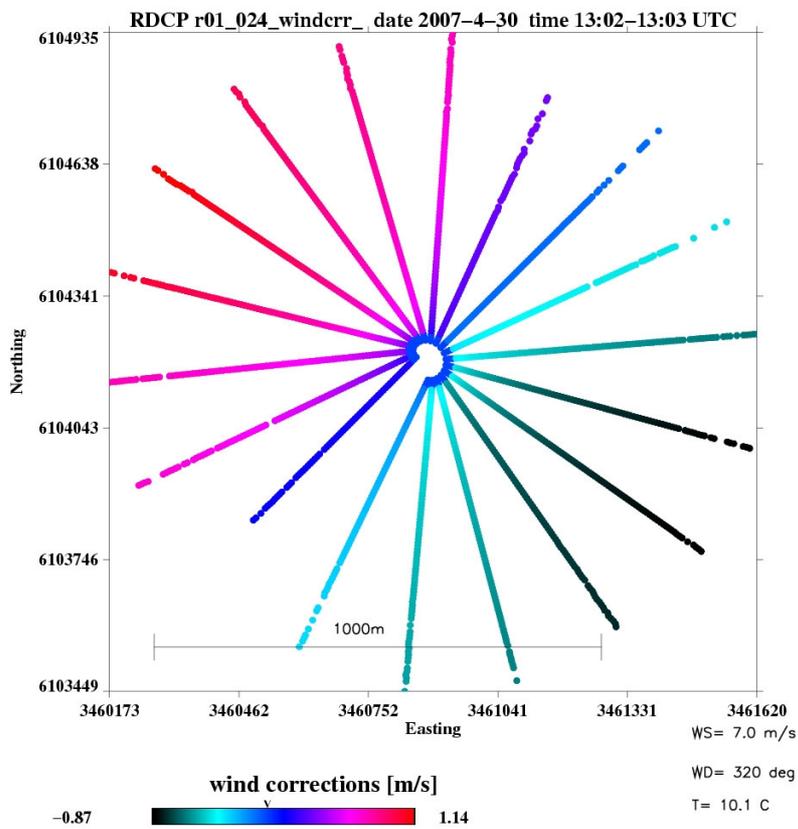


Abb. G2: Windkalibrierungsmessung (radiale Strömungskomponente) aus dem Messgebiet Lister Tief

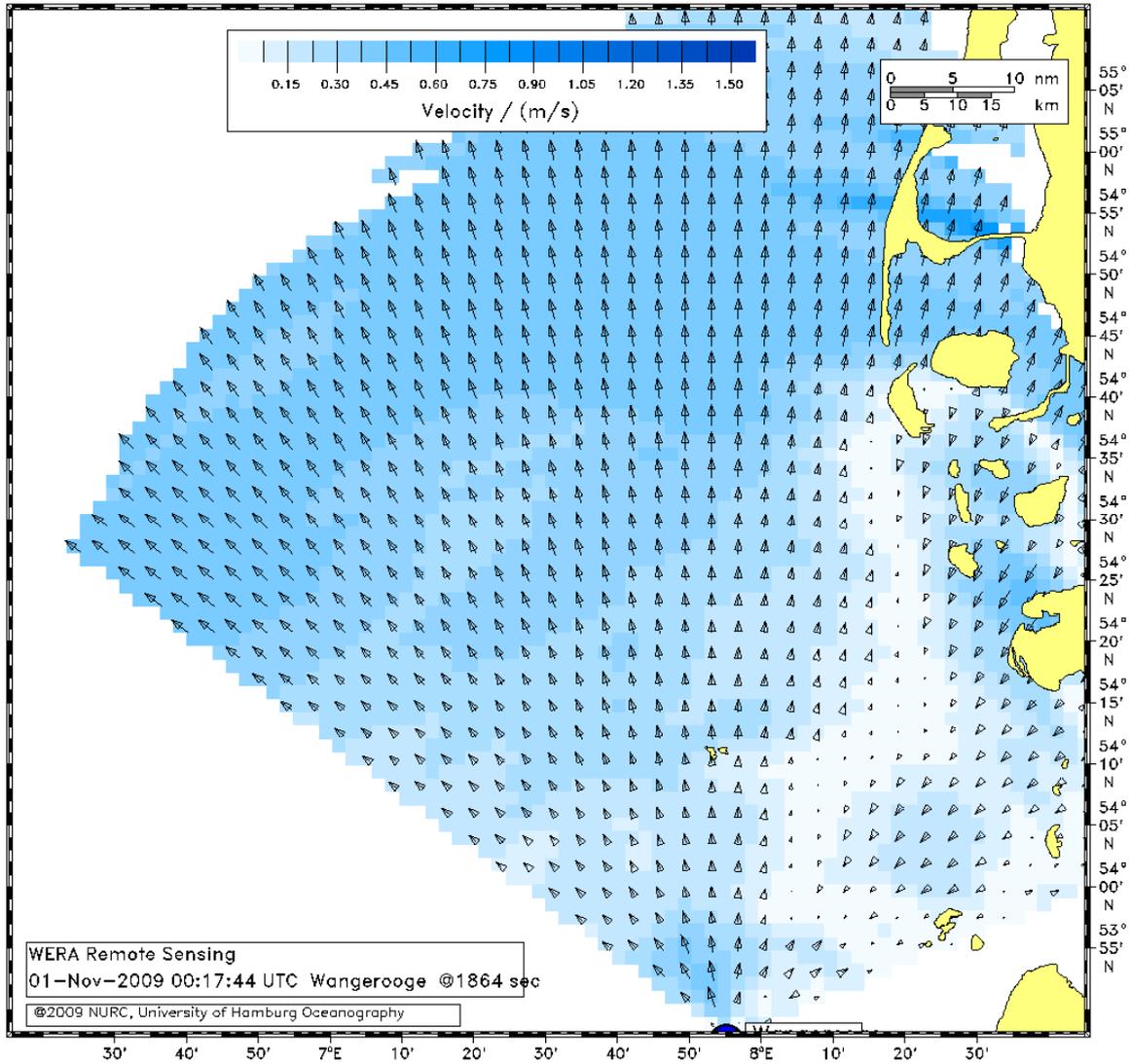


Abb. G4: radiale Strömungskomponente in der Deutschen Bucht erfasst durch die HF-Radarstation Wangerooge

## ANHANG H: Emailverkehr BFG, Sontek, RDI

H1: BFG

Sehr geehrter Herr Cysewski,

beim Anwendertreffen 2009 hat uns leider die Natur einen Strich durch die Rechnung gemacht. Die gemessenen Abflüsse an unserer Messstelle an der Lahn waren wg. einer Hochwasserwelle und Wehrsteuerungen nicht vergleichbar.

Zu Ihren anderen Fragen: siehe unten zwischen -----ANTWORT-----

Mit freundlichen Grüßen  
Matthias Adler

-----Ursprüngliche Nachricht-----

Von: Marius Cyseswki [<mailto:marius.cysewski@gkss.de>]

Gesendet: Sonntag, 10. Oktober 2010 12:38

An: Adler, Matthias, M1, MT

Cc: Marius Cyseswki

Betreff: 6. ADCP Anwendertreff

Guten Tag Herr Adler,

ich lese gerade Ihre BFG Berichte von 2004 und 2007. Leider konnte ich den 2009-er Bericht nicht im Internet finden, daher meine Frage an Sie ob dieser BFG intern existiert und mir zur Verfügung gestellt werden kann.

Ich beschäftige mich mit radarbasierten Strömungsmesssystemen und benutze ADCP fuer Validationen + Korrekturenbestimmung. Die ADCPdaten muessen aber zunaechst korrigiert werden (Kurvenfahrten, Hub, Ausreisser) um mit unserem RDCP ([http://www.coastalwiki.org/coastalwiki/Use\\_of\\_ground\\_based\\_radar\\_in\\_hydrography](http://www.coastalwiki.org/coastalwiki/Use_of_ground_based_radar_in_hydrography)) verglichen werden zu koennen.

Bereinigt Ihre Software Tide die Eingangsdaten? -----nein----

Ist eine Parametrisierung der Vertikalprofile --- was meinen Sie damit? --- und eine extrapolation zur

Wasseroberflaeche moeglich ----ja, wird fuer die Durchflussermittlung immer gemacht---

Im Bericht von 2007 auf den Seiten 23-24 findet eine Diskussion der Fehler statt. Ist dabei auch der Einbaufehler (3-ter Beam parallel zur Schiffsachse) beruecksichtigt ---offset wird ermittelt---- worden? Lief die orientierung nur ueber

interne Fluxgates ----- bei den großen Stahlschiffen, die an der Küste verwendet werden immer-----?

Welche Genauigkeitsstufen (GPS,DGPS,PDGPS) des GPS wurden fuer die GPS-Referenz benutzt ----RTK----?

Vielen Dank fuer Ihre Antwort im Voraus,  
M.Cysewski

## H2: SONTEK-Antwort vom 16.02.2011

Sehr geehrter Herr Cyseswki,

aus Ihrer Email entnehme ich, dass der RDI ADCP mit WinRiver Software zur Durchflussmessung eingesetzt wird?

Die Sontek ADP Systeme (das ist nicht der M9 River Surveyor sondern der ADP) haben einen Kompass und Neigungssensor, der aber ebenfalls keine Korrekturen an den Messzellen durch die Software vornimmt. Es wird lediglich die Information gespeichert. Der River Surveyor M9 im speziellen jedoch führt eine Neigungskorrektur für jedes Sample durch. Ebenso speichert der M9 GPS Daten, so auch die Höhe. Das System gibt aber nur die Wassertiefe unterhalb des Messgeräts an und nicht die Tiefen auf einem absoluten Höhenniveau. Der Anschluss eines externen Bewegungssensors besteht leider nicht, ebenso können keine TRDI Daten eingelesen bzw. generiert werden.

Ich hoffe, das beantwortet Ihre Fragen erst einmal.

Mit freundlichen Grüßen  
Verena Dauben

-----  
Dr. Verena Dauben

Ozeanographin und Betriebswirtin M. A.  
Sales Manager  
MBT GmbH  
Wischhofstrasse 1-3  
24148 Kiel

Tel: +49 (0) 431-7207 203  
Fax:+49 (0) 431-7207 207  
Email: [v.dauben@m-b-t.com](mailto:v.dauben@m-b-t.com)  
Web: [www.macartney.de](http://www.macartney.de)

H3: RDI-Antwort vom 13.10.2010

Marius,

1. The external heading over-writes the field in the PDO data that has the internal compass output. So the internal compass value is not available (or usable) and hence the calibration is not necessary.
2. In WR11 it is not possible to use external tilts.
3. VmDas can be configured to take in external tilts. More information is available under the online help.

Best regards

Dan Murphy

Technical Services, Field Service Engineer

Teledyne - RD Instruments, A member of Teledyne Marine, 14020 Stowe Drive, Poway, CA 92064

Phone:(858) 842 2600 Main, Desk:(858) 842-2637, Mobile: (858) 761-1406 After Hours  
Emergency Service: (858) 842 2700

This email and any files transmitted with it are confidential and intended solely for the use of the individual or entity to whom they are addressed. If you have received this email in error please notify me at [rdifs@teledyne.com](mailto:rdifs@teledyne.com).



