

ADCP-Vermessung über Sandwellen im Lister Tief

**(Vom Fachbereich Geomatik der Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg als Diplomarbeit angenommen)**

ADCP-Vermessung über Sandwellen im Lister Tief

**(Vom Fachbereich Geomatik der Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg als Diplomarbeit angenommen)**

Autorin:

K. Prinz

(Institut für Küstenforschung)

Die Berichte der GKSS werden kostenlos abgegeben.
The delivery of the GKSS reports is free of charge.

Anforderungen/Requests:

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH
Bibliothek/Library
Postfach 11 60
D-21494 Geesthacht
Germany
Fax.: (49) 04152/871717

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

ISSN 0344-9629

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH · Telefon (04152)87-0
Max-Planck-Straße · D-21502 Geesthacht / Postfach 11 60 · D-21494 Geesthacht

ADCP-Vermessung über Sandwellen im Lister Tief

(Vom Fachbereich Geomatik der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg als Diplomarbeit angenommen)

Katharina Prinz

135 Seiten mit 87 Abbildungen und 20 Tabellen

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Wechselwirkung zwischen der Topographie des Meeresbodens und Strömungen, sowie die damit verbundene Entstehung von Signaturen an der Wasseroberfläche untersucht. Für diese Untersuchung wurden im Rahmen eines Feldexperiments im Lister Tief nördlich der Insel Sylt Messdaten erhoben.

Die Strömungsmessungen erfolgten anhand eines ADCP-Strömungsmessgerätes, dessen Funktionsprinzip und Einsatzfähigkeit innerhalb der Arbeit ausführlich dargestellt wird.

Der Experimentaufbau, die zur Datenerhebung und Auswertung eingesetzte Hard- und Software sowie die Datenprozessierung bis hin zur Entstehung von Isolinenbildern werden präsentiert.

Abschließend erfolgt die Gegenüberstellung der Ergebnisse der einzelnen Strömungskomponenten mit bestehenden Theorien und die Erläuterung der Bedeutung für die Abbildung von Oberflächensignaturen mit dem Radar.

ADCP-Measurements Above Sandwaves at the Lister Tief

Abstract

This thesis analyses the interaction between sea bottom topography and currents, as well as associated appearance of signatures on the water surface. This investigation is based on data acquired during a field experiment at the Lister Tief in the north of the island of Sylt. The current measurements were acquired with an ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), whose functional principle and utilisability is described in detail. The experiment configuration, the soft- and hardware used for data collection and analysis as well as the data processing resulting in contour plots are presented. Finally the results of particular current components are compared with existing theories, and the relevance importance for the mapping of surface signatures with radar is discussed.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	viii
Notation	ix
Abkürzungen	xiii
1 EINLEITUNG	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Übersicht über die Arbeit	2
2 MESSKAMPAGNE AUGUST 2002	3
2.1 Messgebiet	3
2.2 Messaufbau	7
2.3 Sensoren	8
2.4 Soft- und Hardware	9
3 REDUKTION DER MESSWERTE	13
3.1 Kreiselkompassmessung	13
3.1.1 Reduktion vom dreidimensionalen Raum auf das Ellipsoid	13
3.1.2 Reduktion vom Ellipsoid auf die Abbildungsebene	17
3.1.3 Fehlweisung des Kreisels	18
3.1.4 Zusammenfassung der Azimutkorrektur	20
3.2 Echolotung	20
3.2.1 Messprinzip	20
3.2.2 Verbesserung der Schallgeschwindigkeit	21
3.2.3 Einfluss der Hangneigung	21
3.2.4 Fehlereinfluss durch Schiffsbewegung	23
3.2.5 Beschickungsfehler	24

4	ADCP-STRÖMUNGSMESSUNGEN	27
4.1	Funktionsprinzip	27
4.1.1	Doppler-Effekt	27
4.1.2	Ausbreitungsverzögerung	29
4.1.3	Schallstruktur	31
4.1.4	Sprungschichten	31
4.2	Dreidimensionale Strömungsmessung	31
4.2.1	Geschwindigkeitsprofile	32
4.2.2	Entfernungstaktung	33
4.3	Systematische und zufällige Fehler	34
4.4	Berechnung der Strömungen	35
4.4.1	Rotation und Translation	36
4.4.2	Korrektur wegen Schiffsgeschwindigkeit	36
4.5	Fehlerquellen der Schallmessung	38
4.5.1	Messung in der Nähe von Grenzflächen	38
4.5.2	Ringing	38
4.5.3	Luftblasen	38
4.5.4	Echointensität	39
4.5.5	Schallabsorption	39
4.5.6	Strahlstreuung	39
4.5.7	Reflektionsverursacher	39
4.5.8	Sprungschichten	39
4.5.9	Schallgeschwindigkeit	40
4.6	Daten	41
4.6.1	Navigationsdaten	41
4.6.2	Strömungsdaten	42
4.6.3	Koordinatensysteme	44
4.6.4	Festlegung der Strömungskomponenten	45

5	SOFTWARE	47
5.1	Verarbeitung der Navigationsdaten	51
5.1.1	nav_einlese.pro	51
5.1.2	standabw.pro	51
5.1.3	wgs_gk.pro	53
5.2	Verarbeitung der Strömungsdaten	55
5.2.1	ADCP_Einlese.pro	55
5.2.2	gyro.pro	55
5.2.3	abgleich.pro	56
5.2.4	Stroemung.pro	57
5.2.5	darst.pro	59
5.2.6	gradient.pro	63
5.3	Echolotung	65
5.3.1	Hang.pro	65
5.3.2	Echolotung_Main.pro	67
5.3.3	Track_Main.pro	67
6	DATENANALYSE UND VERGLEICH	71
6.1	Sandwellenstruktur	71
6.2	Theoretische Überlegungen zur Strömung	74
6.2.1	Bedeutung der Bodentopographie	74
6.2.2	Anpassungsschicht	75
6.2.3	Kontinuitätsgleichung	76
6.2.4	Konvergenz und Divergenz	77
6.3	Analyse der Messergebnisse	79
6.3.1	Allgemeines zu den Strömungsabbildungen	79
6.3.2	Richtungskomponente	81
6.3.3	Parallelkomponente	83
6.3.4	Senkrechte Komponente	85
6.3.5	Vertikalkomponente	87
6.3.6	Gradienten	89
6.4	Bedeutung für Radarmessung	93
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	97

Literaturverzeichnis	99
Glossar	103
Danksagung	105
A Kopfzeilenblock der Strömungsdatei	107
B Erläuterungen zum NMEA-0183	111
B.1 GGA	111
B.2 VTG	112
B.3 cfg-File	113
C Abbildungen zum Experimentaufbau	115

Abbildungsverzeichnis

2.1	Seekartenausschnitt des Messgebietes im Lister Tief	3
2.2	Geländemodell des Messgebietes im Lister Tief	5
2.3	3D-Ansicht des Geländemodells (DGM) vom Messgebiet im Lister Tief	5
2.4	Darstellung der Tidephasen der Messungen	6
2.5	Abbildung der „Ludwig Prandtl“	7
2.6	Anordnung der Sensoren an Bord	7
2.7	Aufbau von ADCP-Aufzeichnungseinheit, Echolotungs- und Navigationsrechner und Funkuhr	10
2.8	Dateiauszug aus einer DigiNav-Profildatei der ersten verwendeten Version	10
2.9	Dateiauszug aus einer DigiNav-Profildatei der zweiten verwendeten Version	11
2.10	Aufbau des Aufzeichnungssystems der Sensordaten	11
3.1	Erläuternde Darstellung zur Lotabweichung	13
3.2	Geoidundulation des EGG97 im Sylter Bereich	15
3.3	Bestimmung der Lotabweichungskomponente ε in Profilrichtung anhand der Punktentfernung und der Geoidundulation	15
3.4	Abbildung eines „Footprints“	21
3.5	Darstellung des durch Hangneigung verursachten Tiefenfehlers	22
3.6	Bestimmung der Hangneigung	22
3.7	Abbildung zum Fehlereinfluss durch Schiffsbewegung	23
3.8	Geometrische Beziehungen zur Durchführung der Beschickung	24
4.1	Erläuterndes Beispiel zum Dopplerversatz	27
4.2	Abbildung der 2fachen Dopplerverschiebung des ADCP-Echos	28
4.3	Abbildung der vom ADCP erfassten Partikelbewegung	29
4.4	Erläuterung zur Phasenänderung bei der Reflektion des ausgesandten Signals	29
4.5	Ausbreitungsverzögerung und Phase beim ADCP-Signal	30
4.6	Abbildung des von einer Partikelwolke zurückkommenden Schallechos	30

4.7	Januskonfiguration der ADCP-Schwinger	32
4.8	Darstellung des Ensembles-Tiefenzellen-Systems; ein Vertikalprofil (Ensemble) besteht aus mehreren Tiefenzellen einer Größe	33
4.9	Abbildung der Entfernungstaktung des vom ADCP empfangenen Signals	34
4.10	Darstellung der Lage der Tiefenzellen beim Rollfehler	35
4.11	Darstellung des Unterschieds zwischen langen und kurzen Impulsen	37
4.12	Ergebnis der CTD-Messung vom 10.8.02	40
4.13	Beispielauszug einer Nav-Datei kor***n.000	41
4.14	Kopfzeilenblock der ADCP-Daten	42
4.15	Beispielauszug aus einer kor***t.000 ADCP-Messdatei	43
4.16	Strömungsrichtung ohne Benutzung eines Kurswinkels	44
4.17	Bezeichnung der Strömungskomponenten	45
5.1	Ablaufschema der Programm-Module	47
5.2	Ablaufdiagramm des Moduls ADCP (erster Teil)	49
5.3	Ablaufdiagramm des Moduls ADCP (zweiter Teil)	50
5.4	Abbildung der Standardabweichung der Ensemblepositionen	52
5.5	Ablaufdiagramm der Transformation vom WGS84 nach GK	54
5.6	Darstellung des Ensembles-Tiefenzellen-Systems; für jedes Ensemble (Vertikalprofil) werden die Tiefenzellen zu einem Wert gemittelt	55
5.7	Darstellung einer stroemung_***.eps-Datei	57
5.8	Beispiel einer Echotest_***.eps-Datei	58
5.9	Programmablauf von darst.pro.	59
5.10	Beispiel einer Isoliniengrafik Echotest_***.eps-Datei	61
5.11	Draufsicht der Strömung eines Ensembles, ***_011.eps	61
5.12	Beispiel einer stAbwERROR_***.eps-Datei	62
5.13	Programmablauf von gradient.pro.	63
5.14	Abbildung des Hangneigungsfehlers eines Profils, Hang3_***.eps-Datei	65
5.15	Programmablauf von Echolot_Main.pro.	67
5.16	Beispiel einer ADCP_Track_Ebbe_Geg.eps-Datei	68
5.17	Programmablauf von Track_Main.pro.	69
6.1	Bezeichnung der Sandwellen S0 – S6	72
6.2	Einteilung der Sandwellenformen	73
6.3	Abbildung von Isolinien des Messgebietes	73

6.4	Abbildung der Lage von Luv- und Leehängen bei Ebbe und Flut	75
6.5	Definition von Konvergenz und Divergenz fluider Medien	77
6.6	Definition von Konvergenz- und Divergenzzonen der Strömung über Sandwellen	77
6.7	schematische Abbildung der Konvergenz- und Divergenzzonen bei Ebbe und Flut	78
6.8	neue Bezeichnung der Strömungskomponenten nach der Drehung des Koordinatensystems	80
6.9	Isoliniengrafik der Strömungsrichtung Θ bei Ebbe	81
6.10	Isoliniengrafik der Strömungsrichtung Θ in der frühen Flutphase	82
6.11	Isoliniengrafik der Strömungsrichtung Θ in der späteren Flutphase	82
6.12	Isoliniengrafik der Parallelkomponente u_{para} bei Ebbe	83
6.13	Isoliniengrafik der Parallelkomponente u_{para} in der frühen Flutphase	84
6.14	Isoliniengrafik der Parallelkomponente u_{para} in der späteren Flutphase	84
6.15	Isoliniengrafik der senkrechten Komponente u_{senk} bei Ebbe	85
6.16	Isoliniengrafik der senkrechten Komponente u_{senk} in der frühen Flutphase	86
6.17	Isoliniengrafik der senkrechten Komponente u_{senk} in der späten Flutphase	86
6.18	Isoliniengrafik der vertikalen Geschwindigkeitskomponente u_{verti} bei Ebbe	87
6.19	Isoliniengrafik der vertikalen Geschwindigkeitskomponente u_{verti} in der frühen Flutphase	88
6.20	Isoliniengrafik der vertikalen Geschwindigkeitskomponente u_{verti} in der späteren Flutphase	89
6.21	Isoliniengrafik von $\partial u_{senk} / \partial \text{Rechtswert}$ bei Ebbe	90
6.22	Isoliniengrafik von $\partial u_{senk} / \partial \text{Rechtswert}$ in der frühen Flutphase	90
6.23	Isoliniengrafik von $\partial u_{senk} / \partial \text{Rechtswert}$ in der späteren Flutphase	91
6.24	Isoliniengrafik von $\partial u_{senk} / \partial \text{Rechtswert}$ bei Ebbe	91
6.25	Isoliniengrafik von $\partial u_{para} / \partial \text{Rechtswert}$ in der frühen Flutphase	92
6.26	Isoliniengrafik von $\partial u_{para} / \partial \text{Rechtswert}$ in der späteren Flutphase	92
6.27	Schematische Grafik des Zusammenhangs von Gradienten und Konvergenz- und Divergenzzonen über asymmetrischen Sandwellen bei Ebbe und Flut	93
6.28	Schematische Darstellung der Advektionslänge bei hydrodynamischer Modulation durch die Bodentopographie	94
6.29	Fotografie der Turbulenzstruktur an der Wasseroberfläche	95
6.30	Radarbild von Oberflächensignaturen	96
A.1	ADCP-Daten Kopfzeilenblock	107
C.1	Navigationsrechner, Funkuhr und Echolot	116
C.2	RDI-Breitband-ADCP 1200 kHz	117
C.3	CTD-Sonde	118
C.4	ADCP-Steuergerät und Aufzeichnungsrechner	119

Tabellenverzeichnis

2.1	Koordinaten des ADCP-Profils	4
2.2	Zusammenstellung von Kurs (KdW) und Geschwindigkeit (FüG) der ADCP-Profile . . .	6
3.1	Koordinaten des Anfangspunktes des ADCP-Profils (Westen)	18
3.2	Koordinaten des Endpunktes des ADCP-Profils (Osten)	18
3.3	Ergebnisse der Berechnung der Schallgeschwindigkeit verschiedener Messmethoden . .	21
4.1	Aufschlüsselung des Strömungsdatenformats	43
5.1	Datenformat WGS_***.dat	51
5.2	Datenformat standabw_***.dat	53
5.3	Transformationsparameter der 7-Parametertransformation von WGS84 nach DHDN [Denker 1989]	53
5.4	Ellipsoidparameter von Bessel Ellipsoid und WGS84	53
5.5	Datenformat GK_***.dat	54
5.6	Datenformat ADCPM_***.dat	55
5.7	Datenformat gyro_***.dat	56
5.8	Datenformat Gyrokorr_***.dat	57
5.9	Datenformat echolot.***_3h und echolot.***_2h	66
6.1	Nomenklatur für Bodenformen	71
6.2	Zusammenstellung der Wellenlängen λ und -höhen δH der Sandwellen	72
6.3	Ausrichtung und Tiefen der Sandwellenkämme	74
6.4	Aufteilung der Wellenlängen der Sandwellen in mittlere Anstiegs- und Abstieglängen .	75
6.5	mittlere Strömungsrichtungen und -beträge aller nicht grob fehlerhaften Profile	80

Notation

Lateinisches Alphabet

a	Transformationsparameter der Kleinpunktberechnung
a	große Halbachse des Ellipsoides
a_0	Konstante
a_1	Konstante
a_2	Konstante
A	gemessene Kreiselkompassrichtung
A_S	Höhe der Sandwelle
b	kleine Halbachse des Ellipsoides
Betrag _{i}	Strömungsbetrag für Tiefenzelle i
c	Schallgeschwindigkeit im Wasser
c_{Real}	reale Schallgeschwindigkeit im Wasser
c_{ADCP}	am ADCP voreingestellte Schallgeschwindigkeit
C	Gaußsche ebene Meridiankonvergenz
d	Tiefe
ds	Punktentfernung in Profilrichtung
dx	Translation in x bei der 7-Parametertransformation
dy	Translation in y bei der 7-Parametertransformation
dz	Translation in z bei der 7-Parametertransformation
dm	Maßstabsfaktor bei der 7-Parametertransformation
dM	mittlere Wassertiefe
dN	Unterschied der Geoidundulation in Profilrichtung
d_b	beschickte Tiefe
d_e	Eintauchtiefe des Echolot-Schwingers
d_m	gemessene Tiefe (Echolot)
d_A	Tiefe am Ort A
d_B	Tiefe am Ort B
d_{ADCP}	Entfernung zwischen ADCP und Boden
$d\hat{f}$	Oberflächensegment
D	Durchmesser
e	erste numerische Exzentrizität
ex	Rotation um x bei der 7-Parametertransformation
ey	Rotation um y bei der 7-Parametertransformation
ez	Rotation um z bei der 7-Parametertransformation

f	Frequenz
Ff	Fahrtfehler
Fw	Fehlweisung
F_d	Frequenz des Dopplerversatzes
F_s	Frequenz in Ruhelage
$fuss_i$	Fußpunkt auf Berechnungslinie (Kleinpunktberechnung)
$f(x)$	Funktion von x
$f'(x)$	erste Ableitung der Funktion von x
G	Gezeitenanteil der Wassertiefe
h	ellipsoidische Höhe
h_Z	Höhe des Zielpunktes über dem Meeresniveau
H	orthometrische Höhe
Hf	Hangneigungsfehler
i	natürliche Zahl
k	natürliche Zahl
K	durch Anbringung der Reduktionen berichtiger Kurs
KrK	Kreiselkompasskurs
KrR	Kreisel-R
l	Entfernung vom Hauptmeridian
l_i	Messwert
lot_i	Lotabstand zur Berechnungslinie (Kleinpunktberechnung)
L_i	Lagrange-Grundpolynom an der Stelle i
L_k	Lagrange-Grundpolynom an der Stelle t
n	Anzahl der Messwerte
N	Geoidundulation
$Nord_i$	Nordkomponente der Strömung der Tiefenzelle i
o	Hilfsparameter der Kleinpunktberechnung
Ost_i	Ostkomponente der Strömung der Tiefenzelle i
r	Erdradius
rwK	rechtweisender Kurs
R	Entfernung des Senders zur Tiefenzelle
Richtung _i	Strömungsrichtung der Tiefenzelle i
R_{max}	maximaler Messbereich, der akzeptable Daten liefert
s	Entfernung Stand–Zielpunkt (Abschnitt 3.1.1)
s	Strecke (Abschnitt 3.2.3)
s_i	Stützwert des Punktes P_i
$s^*(t)$	Interpolationspolynom von t
S	Salzgehalt

St	Stauanteil der Wassertiefe
STD	Standardabweichung
S_T	Schichtdicke der gestörten Wasserschicht
t	ebener Richtungswinkel (GK-Ebene) (Abschnitt 3.1)
t	Laufzeit (Abschnitt 3.2)
t	Stützstelle (Kapitel 5)
t	Zeit (Kapitel 6)
t_k	Stützstelle des Punktes P_k
t_i	Stützstelle des Punktes P_i
T	ellipsoidischer Richtungswinkel (Abschnitt 3.1)
T	Wassertemperatur (Abschnitt 3.2)
u	Strömung
u_{para}	Strömungskomponente parallel zu den Sandwellen
u_{senk}	Strömungskomponente senkrecht zu den Sandwellen
u_{verti}	vertikale Strömungskomponente
v_0	Bahngeschwindigkeit eines erdfesten Punktes am Äquator
v_G	Schiffsgeschwindigkeit
\vec{v}	Geschwindigkeitsvektor
V	relative Geschwindigkeit zwischen Schallquelle und Empfänger (Kapitel 4)
V	Volumen (Kapitel 6)
V_R	Reibungsgeschwindigkeit
V_S	Strömungsgeschwindigkeit
$V_{verbessert}$	korrigierte Strömungsgeschwindigkeit
$V_{unverbessert}$	unkorrigierte Strömungsgeschwindigkeit
x	Variable
\bar{x}	arithmetisches Mittel
x_i	X-Koordinate im gedrehten Strömungskoordinatensystem
x_n	n-ter Wert des Vektors x
X	kartesische Koordinate der Position
X_A	X-Koordinate des Profilanfangpunktes
X_E	X-Koordinate des Profilendpunktes
X_i	X-Koordinate des Punktes P_i (Kleinpunktberechnung)
y_m	mittlerer Rechtswert
y_i	X-Koordinate im gedrehten Strömungskoordinatensystem
Y	kartesische Koordinate der Position
Y_A	Y-Koordinate des Profilanfangpunktes
Y_E	Y-Koordinate des Profilendpunktes
Y_i	Y-Koordinate des Punktes P_i (Kleinpunktberechnung)
Z	kartesische Koordinate der Position

Griechisches Alphabet

α	ellipsoidisches Azimut des Vertikalschnittbogens
α_1	auf Ellipsoid reduziertes ellipsoid. Azimut des Vertikalschnittbogens
α_2	Azimut der geodätischen Linie
β	Öffnungswinkel des Echolot-Schwingers
δH	Höhenunterschied
Δ_x	Differenz der Hochwerte von Ziel- und Standpunkt
γ	Hangneigung
ε	Lotabweichungskomponente in Profilrichtung (Kapitel 3)
ε	Drehwinkel (Kapitel 5)
ζ	gemessener Vertikalwinkel
η	Lotabweichung in Ost-West-Richtung
λ	ellipsoidische Länge
λ	Wellenlänge
λ_0	Hauptmeridian des Gauss-Krüger-Streifens
π	Pi
ξ	Lotabweichung in Nord-Süd-Richtung
ρ	Umrechnungskonstante (Kapitel 3)
ρ	Dichte (Kapitel 6)
φ	ellipsoidische Breite
ψ	Azimutdifferenz der Lotabweichung
Θ	Strömungsrichtung
Θ_1	Winkel des Schallstrahls relativ zur Vertikalen
Λ	astronomische Länge
Φ	astronomische Breite

Sonderzeichen

∇	Nabla-Operator
∂	Differentielles Partial

Abkürzungen

Abkürzungen

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
CTD	conductivity, temperature, depth
DGPS	Differential GPS
DGM	Digitales Geländemodell
DHDN	Deutsches Hauptdreiecksnetz
EGG97	European Gravimetric Geoid 1997
FüG	Fahrt über Grund
4GL	4th Generation Language
GGA	GPS Fix Data
GK	Gauß Krüger
GPS	Global Positioning System
KdW	Kurs durchs Wasser
MESZ	Mitteleuropäische Sommerzeit
NMEA	National Marine Electronics Association
OROMA	O perational R adar and O ptical M apping in monitoring hydrodynamic, morphodynamic and environmental parameters for coastal management
PDGPS	Precise DGPS
RADAR	R adio d etecting a nd r anging
PT	Parametertransformation
RTCM	Radio Technical Commission for Marine Services
UTC	Universal Time Coordinated
VTG	Course Over Ground and Ground Speed
WEK	Wasserstandserrechnungskarte

1 EINLEITUNG

1.1 Allgemeines

In Deutschland unterliegen insbesondere die Inseln der Westküste einer intensiven Morphodynamik. Unterschiedliche Wassertiefen verursachen einen inhomogenen Seegang, der zusammen mit dem Einfluss der Gezeiten eine ständige Veränderung des Meeresbodens in Küstennähe hervorruft [V2T]. Da die hydrographischen Parameter Seegang, Strömung oder Wasserstand einer starken räumlichen und zeitlichen Variationen unterliegen, kann es in relativ kurzen Zeitabständen zu nachhaltigen Veränderungen kommen. Die Durchführung von Küstenschutzmaßnahmen erfordert eine regelmäßige und häufige Erfassung des Zustands und der Dynamik des natürlichen Umfeldes. Ebenso gilt es, die Wechselwirkungen zwischen den getroffenen Maßnahmen und dem natürlichen Umfeld zu beobachten.

Die Messgeräte (Sonden), die bei der Bestimmung von Bodengestalt und Strömung herkömmlicherweise zum Einsatz kommen, bedienen sich zumeist der Ultraschalltechnik. Die konventionellen Messverfahren Echolotung und Strömungsmessung mit ADCP-Sonden sind mit einem relativ hohen Arbeits- und Geräteaufwand (Personal, Messgeräte, Messschiff) verbunden. Die Messmethoden der Radarhydrographie ermöglichen anhand von direkten und indirekten Verfahren eine zeit- und kostengünstigere Bestimmung der physikalischen Parameter. Beim direkten Messverfahren werden Signaturen an der Wasseroberfläche ausgewertet, die sich durch Radarmessungen abbilden lassen. Verursacher solcher Signaturen sind beispielsweise hohe Gradienten in der Topographie, welche Strömungskanten verursachen. Beim indirekten Messverfahren werden die lokalen Tiefen und die oberflächennahe Strömung mit Hilfe inverser Modelle aus den direkt bestimmten Seegangparametern (Länge, Amplitude, Ausbreitungsrichtung und -geschwindigkeit der Wellen) abgeleitet.

Die Entwicklung neuer Monitoringsysteme im Küstenbereich wird innerhalb europäischer Forschungsprojekte gefördert. Die Messkampagne, aus der die Daten für diese Arbeit entstammen, war das erste Feldexperiment innerhalb des europäischen Forschungsprojektes OROMA (**O**perational **R**adar and **O**ptical **M**apping in Monitoring Hydrodynamic, Morphodynamic, and Environmental Parameters for Coastal Management). Das Hauptziel dieses Projektes ist es, küstennahe Topographie und verwandte Umweltparameter zu überwachen und darzustellen. Es soll ein Monitoringsystem entwickelt werden, mit dem man in der Lage ist, die Veränderung der Morphodynamik und anderer Umweltparameter direkt zu erfassen und den Nutzern zur Verfügung zu stellen. Nähere Informationen zu diesem Projekt sind im Internet unter <http://www.brockmann-consult.de/oroma> zugänglich.

Das Institut für Küstenforschung, Abteilung Radarhydrographie des GKSS Forschungszentrums befasst sich mit der Analyse von Bildsequenzen aus Radaraufnahmen der Meeresoberfläche. Innerhalb verschiedener Forschungsprojekte wurden Systeme entwickelt, mit denen Aussagen über die Topographie und deren zeitliche Variabilität sowie das Strömungsfeld getroffen werden können. Die Radardaten werden zu Strömungs- und Tiefenkarten verarbeitet.

1.2 Problemstellung

Um die Modelle zur Berechnung der Topographie aus Radarbildern der Meeresoberfläche optimieren zu können, ist es wichtig, genaue Erkenntnisse über das Verhalten und die Wechselwirkung von Strömung und Topographie zu erlangen. Hierbei geht es vor allem darum, herauszufinden, in wie weit sich durch die Topographie verursachte Strömungsstörungen auf das allgemeine Strömungsverhalten auswirken und wie (und wo) sie sich an der Wasseroberfläche durch Signaturen abbilden. Dies wird nachfolgend am Beispiel der Sandwellen vor Sylt untersucht.

1.3 Übersicht über die Arbeit

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die weiteren Kapitel der Arbeit gegeben. Das Kapitel 2 beschäftigt sich mit der zur Erhebung der Daten durchgeführten Messkampagne. Das Messgebiet wird vorgestellt und ein Einblick in die zur Datenerhebung verwendeten Sensoren und Hard- sowie Software gegeben. Die Reduktion der Messwerte vor der Weiterverarbeitung zu Abbildungen ist Thema im Kapitel 3. Kapitel 4 befasst sich allgemein mit der Funktionsweise eines ADCP-Strömungsmessers und der Struktur der gewonnenen Ergebnisdateien.

Die Struktur der Programme, die im Rahmen dieser Arbeit zur Auswertung und Darstellung der Strömungsdaten entwickelt wurden, wird in Kapitel 5 wiedergegeben. In Kapitel 6 werden schließlich die Ergebnisse der Auswertung dargestellt, die Ergebnisgrafiken erläutert und diskutiert. Abschließend erfolgt in Kapitel 7 eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Arbeit in einer Schlußaussage, wobei auch ein Ausblick auf mögliche Anschlussuntersuchungen gegeben wird.

Für die Darstellung von Dezimalzahlen werden in dieser Arbeit Dezimalpunkte als Trennzeichen verwendet.

2 MESSKAMPAGNE AUGUST 2002

2.1 Messgebiet

Das Messgebiet der Messkampagne vom August 2002 liegt im 'Lister Tief', zwischen der Nordspitze der Insel Sylt und der dänischen Insel Rømø. Es umfasst eine Fläche von etwa 8 km² (Abbildung 2.1) und reicht über die deutsch-dänische Grenze hinaus.

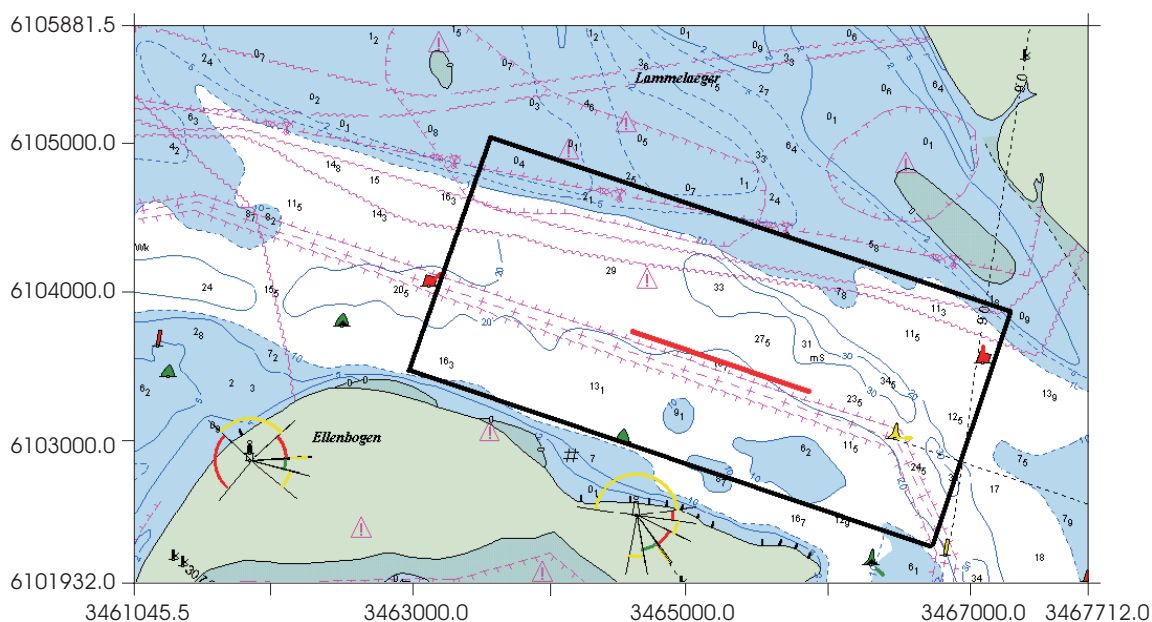


Abb. 2.1: Abbildung des Echolotungsgebietes (Rechteck) und des ADCP-Profiles (rote Profillinie, 1250 m) im Lister Tief, Seekartenausschnitt (ungefährer Maßstab 1:50000) aus der elektronischen Seekarte von C-Map, Version CM-93 Edition 2, erschienen 2002.

Da die Küstenlinie von Sylt einem starken morphologischen Wandel unterworfen ist, werden seit 1972 Sandaufspülungen an der Westküste durchgeführt, um den Sandverlust auszugleichen und weitere Abbrüche der Dünen zu verhindern bzw. zu kompensieren [Min 2001].

Für die Radarmessungen bietet sich dieses Gebiet an, da es zu erproben gilt, ob die Bewegung eventuell vagabundierender Sände (signifikante Änderungen der Topographie) mit dem Radarverfahren zu erfassen ist und somit die herkömmlichen in-situ Messungen (Echolotung) durch dieses Fernerkundungsverfahren ergänzt werden können. Hinzu kommt, dass dort eines der dynamischsten Sandwellenfelder der deutschen Küstengebiete liegt. Dieses ist auch für die Strömungsmessungen interessant, da große

Sandwellenstrukturen Signaturen an der Wasseroberfläche hervorrufen, deren Charakteristika anhand der Strömungsmessung genauer untersucht werden sollen.

In der Messkampagne kamen verschiedene hydrographische Messgeräte zum Einsatz: nautisches Radar (Kelvin Hughes RSR 1000 X-Band VV polarisiertes Flussradar), Einstrahl-Echolot (SingleBeam Echolot Navisound 2000), ADCP (RD Instruments Breitband-ADCP), Luftsonde (Siggelkow Gerätebau GmbH Soni 3) und eine CTD-Sonde (ME Ecosonde). Diese Arbeit befasst sich ausschließlich mit den durchgeführten Strömungsmessungen und der zugehörigen Echolotung.

Die Echolotmessungen wurden im gesamten Messgebiet zur Erfassung der Bodenstruktur und Ausrichtung der bereits „bekannten“ Sandwellen des Gebietes vorgenommen (vgl. Abbildung 2.2 und 2.3). Es wurden 36 Echolotungsprofile in einem Abstand von 50 m zueinander parallel zur Küste festgelegt, die durch 24 Querprofile im gleichen Abstand ergänzt werden. Das Ergebnis der Echolotung soll zu einem späteren Zeitpunkt als ein Vergleichstiefenwert zu den Ergebnissen der Tiefenbestimmung aus den Radarmessungen dienen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Echolotungsdaten dieser Kampagne einem Testlauf angehören und daher die Beschickung nicht ausreichend genau durchgeführt wurde, um exakte Tiefenaussagen treffen zu können (siehe auch Abschnitt 3.2.5).

Im Laufe der Durchführung der Echolotungen wurde ein für die ADCP-Messung geeignetes Profil von etwa 1250 m Länge festgelegt, das eine besonders ausgeprägte und abwechslungsreiche Sandwellenstruktur aufweist (Abbildung 2.1). Die Gauß-Krüger-Koordinaten (GK-Koordinaten) und die WGS84-Koordinaten des Bereiches für die ADCP Messung sind der Tabelle 2.1 zu entnehmen.

Tab. 2.1: Koordinaten des ADCP-Profiles (Abbildung 2.1 einzelne Linie).

	GK-Koordinaten		WGS84-Koordinaten	
	Rechtswert [m]	Hochwert [m]	λ	φ
Anfangspunkt	3465004.5	6103524.9	8°27'04.50"	55°3'33.42"
Endpunkt	3465745.6	6103267.2	8°27'46.36"	55°3'25.27"

Das Profil der Strömungsmessung wurde während der Ebb- und in der Flutphase 10 mal abgefahren, jeweils fünf Mal mit der und fünf Mal gegen die Strömung. Der Beginn eines Profils wurde nach den Tidephasen ausgerichtet, um verschiedene Phasen bei steigendem oder fallendem Wasser abzudecken. Die Fahrtgeschwindigkeit wurde so gering wie möglich gehalten, um eine möglichst hohe Datendichte zu erreichen. Bei der Fahrt gegen die Strömung konnte im Durchschnitt eine Geschwindigkeit von 3 kn eingehalten werden, mit der Strömung eine Geschwindigkeit von 6 kn. Dies bedeutet, dass etwa alle 10 ... 20 m ein vertikales Strömungsprofil gemessen wurde. Eine langsamere Fahrt hätte eine zu große Abweichung des Schiffes vom Sollprofil zur Folge gehabt. Die gefahrenen Kurse und Geschwindigkeiten der einzelnen Profile sind in Tabelle 2.2 aufgeführt. Die Profile 014, 015 und 016 fehlen, da diese während Stauwasser für einen anderen Zweck gefahren wurden.

Die mittleren Kurse wurden aus der Aufzeichnung der Kreiselkompassrichtungen ermittelt. Diese weichen vom Richtungswinkel des Sollprofiles (etwa 109°) ab. Dies ist dadurch zu erklären, dass gegenüber dem Sollwert bei den Profilfahrten häufige Kursänderungen und auch ein Vorhaltewinkel auftraten, die die Mittelbildung der Kursrichtung beeinflusst haben.

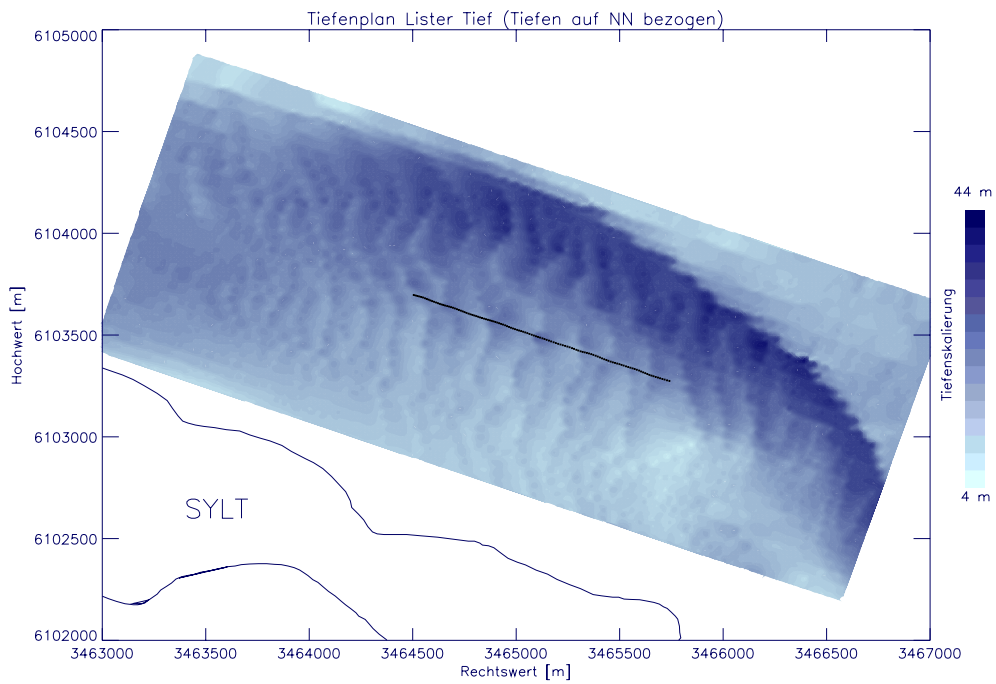


Abb. 2.2: Geländemodell des Messgebietes im Lister Tiefs, mit eingezeichnetem Track eines ADCP-Profiles; die Messwerte werden auf ein 20-m-Gitter gemittelt dargestellt.

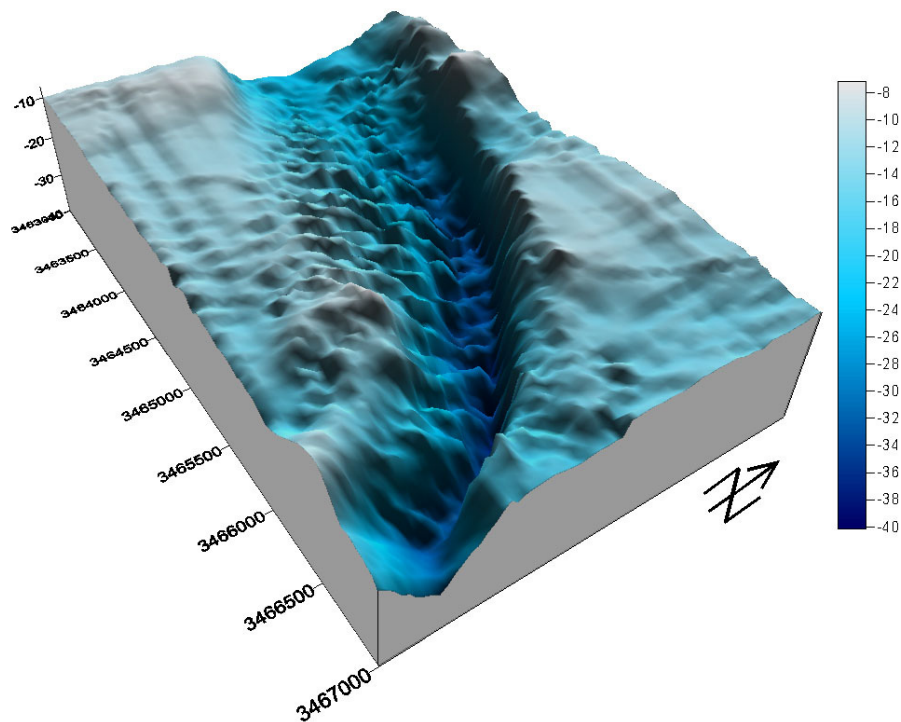


Abb. 2.3: 3D-Ansicht des Geländemodells (DGM) vom Messgebiet im Lister Tief, basierend auf einem 20-m-Gitter.

Tab. 2.2: Zusammenstellung von Kurs (KdW) und Geschwindigkeit (FüG) der gefahrenen Profile.

EBBE			FLUT		
Datei	KdW [°]	FüG [kn]	Datei	KdW [°]	FüG [kn]
004	269	6	017	288	3
005	104	3	018	97	6
006	278	6	019	285	2
007	103	3	020	105	6
008	278	6	021	96	6
009	102	3	022	290	2
010	279	6	023	95	7
011	102	3	024	289	2
012	267	5	025	96	7
013	102	3	026	291	2

In Abbildung 2.4 sind die Tidekurven der beiden Messtage 10. und 12. August 2002 aufgezeigt. Die linke Kurve entspricht dem Tideverlauf des ersten Messtages und die rechte dem des zweiten Messtages. Die Profile sind entsprechend ihrer Aufzeichnungszeit und -dauer durch schraffierte Blöcke dargestellt. Bei den Profilen zwischen 5:00 Uhr und 8:00 Uhr UTC handelt es sich um die Ebbprofile und bei den Profilen zwischen 9:00 Uhr und 11:00 Uhr UTC um die Flutprofile des ersten Messtages. Die Messung der Flutprofile zwischen 11:00 und 14:00 Uhr UTC wurde am zweiten Messtag durchgeführt. Die Tidephase der Profile ist der jeweils zugehörigen Tidekurve zu entnehmen.

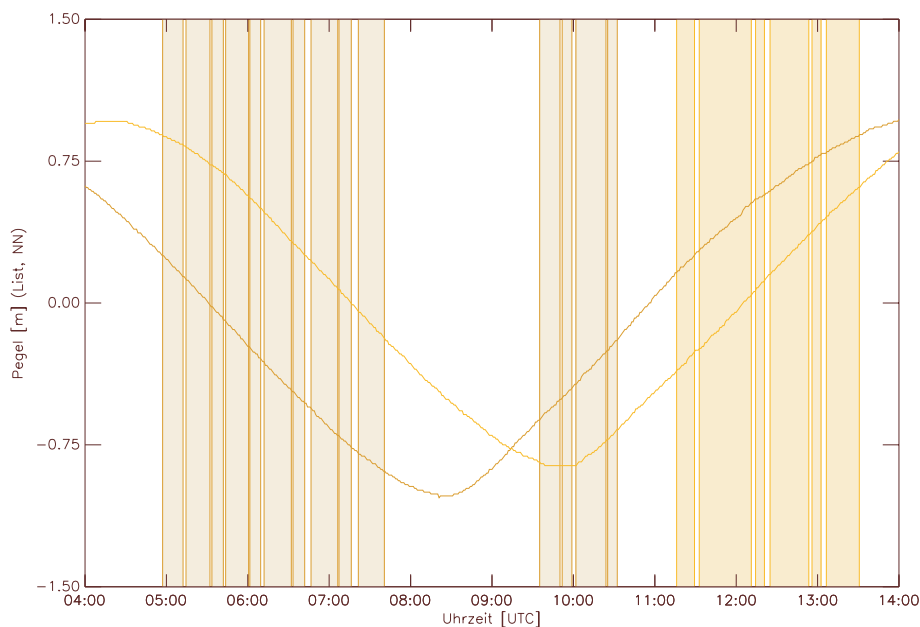


Abb. 2.4: Darstellung der Tidephasen der beiden Messtage 10.08.2002 und 12.08.2002 mit Überblendung der Zeiträume, in denen die ADCP-Profile gefahren wurden.

2.2 Messaufbau

Die Messungen fanden von Bord des GKSS-eigenen Forschungsschiffes „Ludwig Prandtl“ (siehe Abbildung 2.5) aus statt. Die „Ludwig Prandtl“ hat eine Länge über alles von 32.50 m und besitzt unter Ballast einen Tiefgang von ca. 1.40 m [GKS]. Die messtechnische Ausstattung variiert von Kampagne zu Kampagne. Genauer zu den im Rahmen der ADCP-Messungen eingesetzten Sensoren GPS, Echolot und ADCP ist dem Abschnitt 2.3 zu entnehmen.

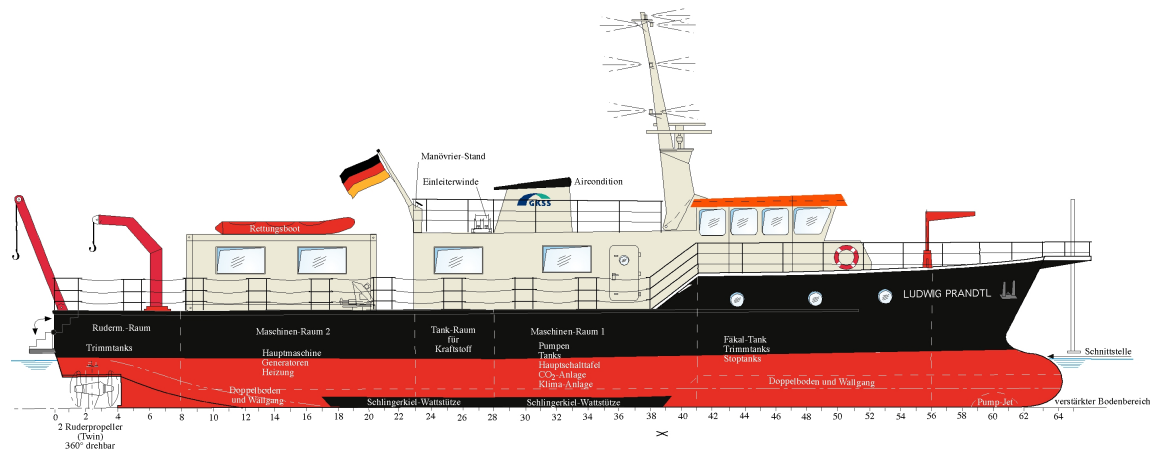


Abb. 2.5: Forschungsschiff „Ludwig Prandtl“.

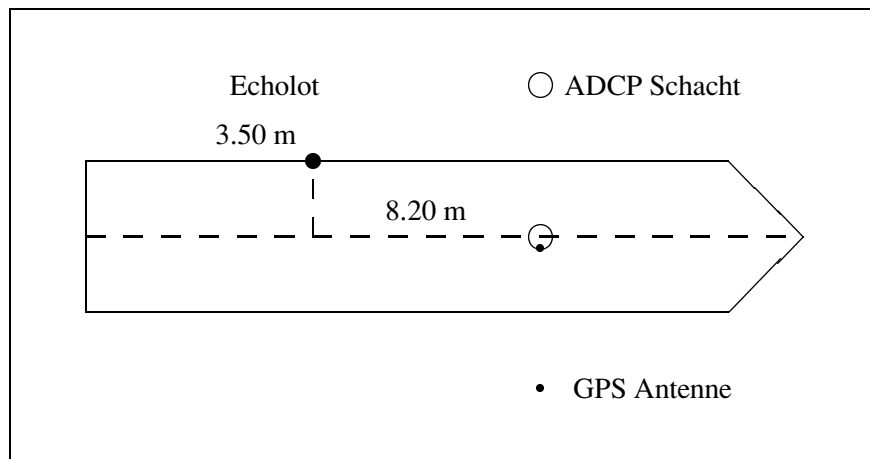


Abb. 2.6: Schematische Darstellung der Positionen der Sensoren an Bord der „Ludwig Prandtl“.

Die Sensoren wurden an Bord an unterschiedlichen Positionen montiert, sodass die GPS-Koordinaten für den jeweiligen Sensor bei der Auswertung anhand der Einmessungswerte (vgl. Abbildung 2.6) und den von der GPS-Antenne gegebenen Positionen berechnet werden müssen. Die positionsgebende GPS-Antenne des NavBeacon ist in etwa 0.60 m Entfernung zur Kielrichtung (Schiffslängsachse) am Mast im vorderen Schiffsteil befestigt. Die Höhe der Antenne spielt keine Rolle, da die Beschickung der Tiefendaten nicht anhand der GPS-Daten durchgeführt wird.

Der ADCP wird in einem Schacht (Moon Pool) abgesenkt, der sich in der Schiffslängsachse befindet und einen ungefähren Durchmesser von 0.60 m hat. Er wird auf eine Tiefe von 1.70 m abgesenkt, so dass die Schwinger einige Zentimeter über die Schiffsunterseite hinaus ins Wasser ragen. Die Lage des

Schachtes innerhalb der Schiffslängsachse und unter dem Mast ergibt eine bis auf etwa 0.60 m zur GPS-Antenne unterschiedliche ADCP-Lage. Die Positionen für das ADCP müssen nicht umgerechnet werden, da bei Einsatz eines NavBeaconsystems im differentiellen Modus mit einer Genauigkeit von $\pm 0.5 \dots 1$ m (1σ) zu rechnen ist und die Ablage der Antenne von 0.60 m zur Schiffslängsachse noch innerhalb dieser ohnehin zu erwartenden erreichbaren Genauigkeit liegt.

Der Echolotschwinger ist an der Backbordseite im achteren Schiffsteil befestigt und zur Berechnung der Koordinaten für die Echolotung ebenfalls eingemessen worden. Die Eintauchtiefe wurde mit 1.67 m eingestellt. Da die Anströmung und Luftblasenbildung während der Fahrt relativ hoch war, mussten die Echos der oberen 3.20 m ausgeblendet werden, um den Empfang eines Bodenechos als erstes Echo zulassen zu können.

2.3 Sensoren

Ortung

Die Ortung erfolgte mit dem DSM212 NavBeacon von Trimble [Tri], einem DGPS-System, das die Möglichkeit besitzt, über Langwelle Korrekturdaten im RTCM 2.0 Format zu empfangen. Es handelt sich um einen 12-kanaligen Einfrequenzempfänger (L1) mit einer erreichbaren Genauigkeit von $\pm 30 \dots 40$ m im GPS-Modus und $\pm 0.5 \dots 1$ m im DGPS-Modus (1σ). Die Datenrate ist 1 Hz. Die Datenausgabe erfolgt im NMEA-0183 Datenformat. Bei NMEA-0183 handelt es sich um einen amerikanischen Standard, der Anforderungen an das Übertragungssignal, das Datenübertragungsprotokoll und die Datensätze von Instrumenten nautischer Anwendungen definiert. Weitere Informationen zum NMEA-Standard sind dem Anhang B zu entnehmen.

Bei dem zur Bestimmung des Kurswinkels und der Kursänderungen eingesetzten Kreiselkompass handelt es sich um einen Arma-Brown Mk.5 Kreiselkompass, welcher mindestens alle 0.27 \dots 0.28 Sekunden einen Kurswert bereitstellt. Der Kompass wurde entgegen der Fahrtrichtung aufgebaut, da die Zugänglichkeit zum Gehäuse gewährleistet werden musste. Alle Kursdaten müssen deswegen vor oder während der Weiterverarbeitung um 180° korrigiert werden. Die Ausrichtung der 180° -Richtung des Kompasses in Schiffsvorausrichtung erfolgte anhand des schiffseigenen Kreisels.

Lotung

Das verwendete Einstrahl-Echolot ist ein Navisound 2000 von Navitronics (Reson) mit einem Tiefenmessbereich bis 640 m. Es erlaubt eine Messung mit den Frequenzen 210 kHz und 30 kHz. Die Genauigkeit wird mit $<$ als 10 cm bei 30 kHz und $<$ als 1 cm bei 210 kHz, die Auflösung mit 1 cm angegeben [Res]. Die Datenausgabe erfolgt sowohl über die Schnittstelle als auch zusätzlich auf einen Papierrekorder mit einer Frequenz von 1 \dots 20 Hz. Der Öffnungswinkel des Schwingers errechnet sich nach [Bruns 2001]

$$\beta = \frac{65\lambda}{D}, \quad (2.1)$$

mit

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.2)$$

und:

β : Öffnungswinkel des Schwingers
 λ : Wellenlänge

- c : Wasserschallgeschwindigkeit (1500 m/s)
 f : Frequenz (210 kHz)
 D : Durchmesser des Schwingers.

Dies ergibt bei einem Durchmesser von 75 mm einen Öffnungswinkel des Schwingers von 6° .

Der Schwinger der 15 kHz Frequenz konnte wegen eines Defekts bei der Messfahrt nicht eingesetzt werden. Dies stellt kein Problem dar, da der Meeresboden im Messgebiet nördlich Sylt vorwiegend aus Sänden besteht. Die hohe und tiefe Frequenz würden ungefähr an derselben Schicht reflektiert werden, da es sich bei sandigem Untergrund um eine harte Sprungschicht handelt. Eine Bestimmung der Schlickauflage oder von Schichten war nicht Absicht der Messungen. Später, bei der Auswertung der ADCP-Messung, sollen die Echolottiefen zusätzlich als Plausibilitätskontrolle für die maximalen ADCP-Tiefen und zur Erkennung der Zuordnung von Positionsdaten zu den Vertikalprofilen der Strömungsmessung dienen.

Strömungsmessung

Für die Strömungsmessungen wurde der Breitband ADCP von RDInstruments [RDI] eingesetzt. Dieser ADCP arbeitet bei einer Frequenz von 1200 kHz mit vier Strahlen und einem Strahlwinkel (Beamwinkel) von 20° . Die Schwinger sind konvex angeordnet und lassen somit den Einsatz in einem Schacht zu. Die maximale Messtiefe für 1200 kHz wird mit 35 m angegeben. Das ADCP verfügt sowohl über Sensoren zur Temperaturmessung ($\pm 0.5^\circ \text{ C}$ (1σ)) als auch zur Bestimmung des Kurswinkels sowie des Roll- und Stampfwinkels ($\pm 1^\circ$ (1σ)). Die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung liegt bei Verwendung von 25 cm großen Tiefenzellen bei $\pm 10 \text{ cm/s}$. Erläuternde Angaben zu technischen Daten und der Funktionsweise des ADCP sowie zur Rohdatenstruktur sind im Kapitel 4 enthalten.

2.4 Soft- und Hardware

Zur Datenaufzeichnung wurden zwei PC-Systeme mit unterschiedlichen Betriebssystemen verwendet. Um die Synchronisation der Datenaufzeichnung auf den beiden PC-Systemen in etwa zu gewährleisten, bestand nur die Möglichkeit, die Rechneruhren jeweils mindestens am Morgen des Messtages anhand der Funkuhr (Hopf System 7001 [Hop]) manuell zu synchronisieren. Bei Beobachtung eines großen Zeitunterschiedes (> 5 Sekunden) wurde über Tag erneut synchronisiert.

Die Aufzeichnung der ADCP-Daten wurde mit Hilfe eines Olivetti Laptops mit DOS-Betriebssystem realisiert (Abbildung 2.7, rechts). Bei dem verwendeten Aufzeichnungsprogramm handelt es sich um *Transect* der Firma RDInstruments. Dies ist ein menügesteuertes DOS-Programm, in dem die Messung vorbereitet, durchgeführt und schließlich auch ausgewertet werden kann.

Die Daten des Echolotes und des Kreiselkompasses wurden auf einem tragbaren Industrie-PC der Firma Dolch Computer Systems GmbH mit Windows98-Betriebssystem aufgezeichnet (Abbildung 2.7, links). Das hierzu verwendete Programm *DigiNav* der Firma Hydrographic Service GmbH [Hyd] dient zur Datenaufzeichnung und Navigation. Es können die Datensätze von bis zu acht Sensoren gleichzeitig aufgezeichnet und mit Zeitstempel versehen abgespeichert werden. Die GPS-Positionen können am Bildschirm direkt in einem vorher georeferenzierten Seekartenausschnitt des Gebietes dargestellt werden. Die Darstellung der Seekarte sowie der Schiffspositionen wurden während der Messfahrt ebenfalls auf einem TFT-Display auf der Brücke für den Schiffsführer zur Navigation angezeigt.

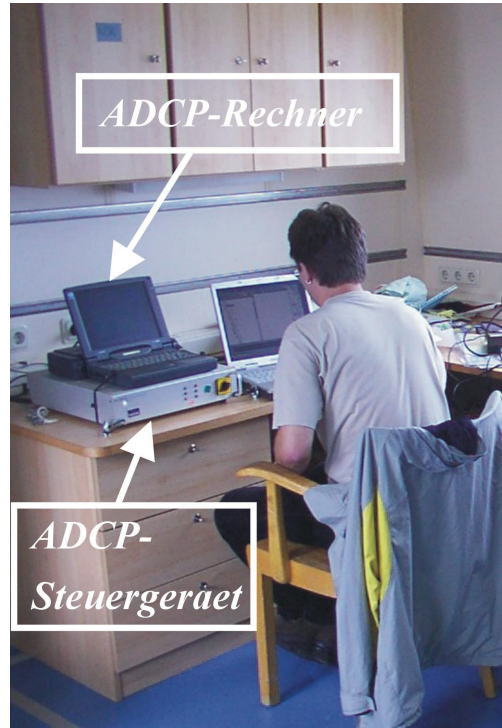
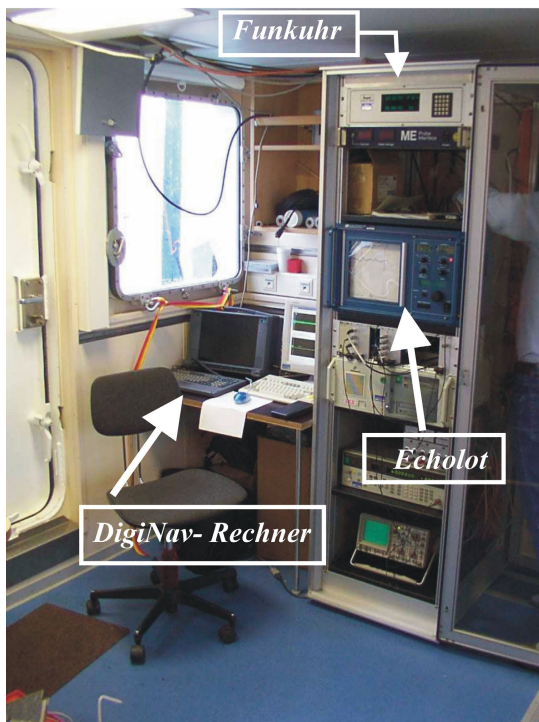


Abb. 2.7: links: Aufbau zur Aufzeichnung von Navigations- und Echolotungsdaten, rechts: ADCP-Aufzeichnungseinheit bestehend aus dem Steuergerät für die Sonde und dem Laptop zur Datenaufzeichnung.

Die DigiNav-Version wurde zwischen den beiden Messtagen gewechselt, da das Programm aufgrund besonderer Gegebenheiten der Kampagne (z.B. der Kreiselkompass war entgegen der Fahrtrichtung aufgestellt) für den weiteren Einsatz optimiert werden musste. Die entstandenen Profildateien weisen daher einen geringfügigen Formatunterschied auf, der bei der Auswertung beachtet wurde.

Während bei der ersten Version sowohl die GGA- als auch die VTG-Strings mit Datensatznummern versehen sind, erhalten in der zweiten Version lediglich die GGA-Strings noch Datensatznummern (vgl. Abbildung 2.8 und 2.9). Da die Zeilenlänge der GGA-Zeile die Länge einer Textzeile überschreitet, wird diese hier in zwei Zeilen dargestellt. Um dennoch zu verdeutlichen, welche Daten in eine Zeile gehören, wurden die Zeilen mit Zeilennummern versehen.

```

zeile 1- DSN=00001 $GPGGA,060131,5503.4412779,N,00827.7418660,E,2,07,1.0,7.83,M,44.60,M,5.0,0705*6
          Z=28893.660 D=08-10-2002 v=01.7
zeile 2- 900240890000001000000 Z=28893.830 D=08-10-2002
zeile 3- 900240890000001000000 Z=28893.880 D=08-10-2002
zeile 4- DSN=00002 $GPVTG,306.9,T,,003.22,N,005.96,K,D*4 Z=28893.830 D=08-10-2002 v=01.7
zeile 5- 900240890000001000000 Z=28893.940 D=08-10-2002
zeile 6- 900240890000001000000 Z=28893.990 D=08-10-2002
zeile 7- 108.7 Z=28893.990 D=08-10-2002 sensor3

```

Abb. 2.8: Beispielauszug aus einer DigiNav-Profildatei, erste verwendete Version — VTG-Strings erhalten eine Datensatznummer.

```

zeile 1- DSN=00000 $GPGGA,125553,5503.6466335,N,00826.5755525,E,2,09,1.0,8.18,M,44.60,M,6.0,0492*6
Z=53754.260 D=08-12-2002 v=02.9
zeile 2- 344.8 Z=53754.420 D=08-12-2002 sensor3
zeile 3- 900210590000001000000 Z=53754.420 D=08-12-2002
zeile 4- 900210590000001000000 Z=53754.480 D=08-12-2002
zeile 5- $GPVTG,114.3,T,,002.08,N,003.85,K,D*4 Z=53754.420 D=08-12-2002 v=02.9
zeile 6- 900210690000001000000 Z=53754.530 D=08-12-2002
zeile 7- 900210690000001000000 Z=53754.590 D=08-12-2002
zeile 8- 344.0 Z=53754.700 D=08-12-2002 sensor3

```

Abb. 2.9: Beispielauszug aus einer DigiNav-Profildatei, zweite verwendete Version — VTG-Strings erhalten keine Datensatznummer.

Festlegung der Dateinamen

Bei der Aufzeichnung von Strömungsdaten werden durch das ADCP-Aufzeichnungsprogramm *Transect* pro Profil je zwei Dateien angelegt. Eine enthält die Strömungsdaten, die andere die Navigationsdaten des Profils. Die Benennung der Dateien erfolgt durch *Transect*. Es kann ein Stammname angegeben werden, der dann jeweils durch fortlaufende dreistellige Nummern und einem 't' für die Strömungsdaten oder einem 'n' für die Navigationsdaten vom Programm ergänzt wird. In dieser Arbeit wurden die Strömungsdaten in Dateien mit der Bezeichnung *kor***t.000* und *kor***n.000* gespeichert. Ersteres repräsentiert die Strömungsdateien, letzteres die Navigationsdateien. Die '***' stehen für die fortlaufend erzeugten Nummern der Profile, welche auch in der Bezeichnung der Echolotprofile eingesetzt werden.

Die Rohdaten der Echolotprofilfahrt wurden in die Dateien *profil***.raw* abgelegt, wobei zur Gewährleistung der eindeutigen Zuordnung die selbe Nummerierung wie bei den ADCP-Profilen verwendet wurde. Bei den ebenfalls in der Auswertung verwendeten beschickten und wegen Exzentrizität des Echolots zur GPS-Antenne korrigierten Echolotdaten wurde die Bezeichnung *echolot.***_3* (beschickte Daten, positionskorrigiert) und *echolot.***_2* (unbeschickte Daten, nicht positionskorrigiert) gewählt, um auch hier die eindeutige Zusammengehörigkeit der Daten darzustellen. Den in der Auswertung wegen Hangneigung korrigierten Echolotungen wurde im Dateinamen ein 'h' angefügt, sodass sich *echolot.***_3h* und *echolot.***_2h* ergeben.

Das Zusammenspiel der verschiedenen Messsensoren und Rechner sowie der entstehenden Rohdateien ist in Abbildung 2.10 aufgezeigt.

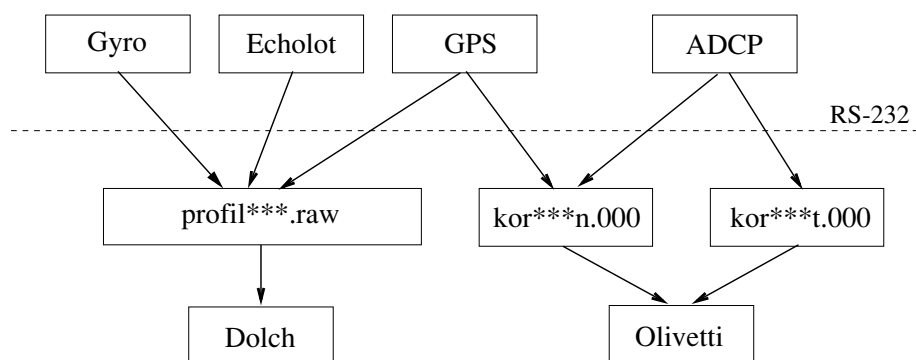


Abb. 2.10: Übersicht der Aufzeichnung der Sensordaten auf den beiden Rechnern.

3 REDUKTION DER MESSWERTE

Um die Ergebnisse der Messungen in Karten darstellen zu können, sind einige Reduktionen und Verbesserungen der gemessenen Kreiselkompassrichtungen und Echolotungen nötig. Im Folgenden wird hierauf weiter eingegangen.

3.1 Kreiselkompassmessung

3.1.1 Reduktion vom dreidimensionalen Raum auf das Ellipsoid

Lotabweichungen

Zur Darstellung im Gauß-Krüger-System werden die gemessenen Richtungen anhand eines mathematisch definierten Rotationsellipsoides (in Deutschland beispielsweise Besselellipsoid) umgerechnet. Zwischen der Realität und diesen mathematischen Modellen bestehen Unterschiede, die sich zum Beispiel in der Lotabweichung zeigen. Bei der Lotabweichung handelt es sich um den Unterschied zwischen der physikalischen Lotrichtung (wahre Lotrichtung im Schwerfeld) und der Ellipsoidnormalen (Abbildung 3.1). Sie entspricht einem Stehachsfehler.

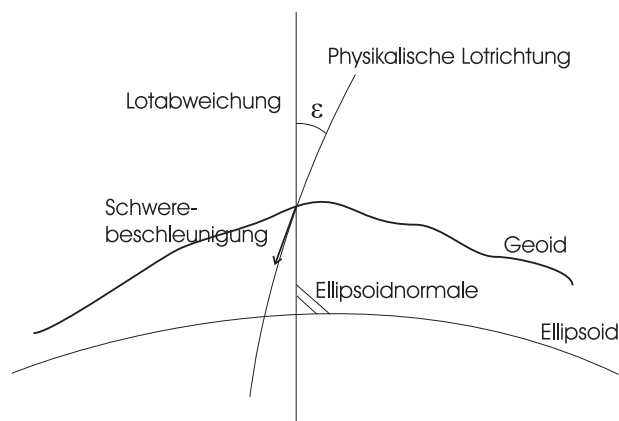


Abb. 3.1: Darstellung der Lotabweichung.

Man unterscheidet die Lotabweichungskomponenten ξ , η und ψ , die die Beziehung zwischen dem lokalen ellipsoidischen und dem lokalen astronomischen System beschreiben. Hierbei stellen ξ und η die Komponenten der Lotabweichung in Richtung des Meridians (Nord-Süd) bzw. senkrecht dazu (Ost-West-Richtung) dar. ψ ist die Azimutdifferenz.

Die Formeln zur Berechnung lauten [Torge 2003]:

$$\xi = \Phi - \varphi, \quad (3.1)$$

$$\eta = (\Lambda - \lambda) \cos \varphi, \quad (3.2)$$

$$\psi = (\Lambda - \lambda) \sin \varphi, \quad (3.3)$$

wobei:

Φ, Λ :	astronomische Breite und Länge
φ, λ :	ellipsoidische Breite und Länge
ξ :	Lotabweichungskomponente in Nord-Süd-Richtung
η :	Lotabweichungskomponente in Ost-West-Richtung
ψ :	Azimutdifferenz.

Zur Reduktion der beobachteten Azimute und Horizontalrichtungen auf das Ellipsoid wird die Laplacesche Gleichung (3.4) verwendet. Diese berücksichtigt den Einfluss der Lotabweichung und lautet auf den Normalschnitt bezogen:

$$A - \alpha = \eta \tan \varphi + \cot \zeta [\xi \sin \alpha - \eta \cos \alpha], \quad (3.4)$$

mit:

A :	gemessene Kreiselkompassrichtung
α :	ellipsoidisches Azimut des Vertikalschnittbogens
η :	Lotabweichungskomponente Ost-West-Richtung
ζ :	gemessener Zenitwinkel
ξ :	Lotabweichungskomponente Nord-Süd-Richtung
φ :	ellipsoidische Breite.

Ausgehend von einer horizontalen Visur ergibt sich $\cot \zeta = 0$. Die Gleichung zur Korrektur der Kreiselkompassrichtung (Azimut) vereinfacht sich somit zu

$$A - \alpha = \eta \tan \varphi \quad (3.5)$$

und ist mit (3.3) kompatibel.

Da bei der Messkampagne keine astronomischen Beobachtungen vorgenommen wurden, wird die Größenordnung der Lotabweichung anhand der Geoidundulationen des EGG97 bestimmt. Die Daten dieses Quasigeoidmodelles entstammen der CD-ROM des Instituts für Erdmessung der Universität Hannover. Die Darstellung der Geoidundulation wird im Bereich von Sylt durch eine Grafik mit Isolinien im mm-Abstand dargestellt (Abbildung 3.2).

Das ADCP-Profil sowie der Verlauf eines Ost-West als auch eines Nord-Süd gerichteten Profils zur Bestimmung der Lotabweichung in diesen Richtungen sind eingezeichnet. Es kann abgelesen werden, dass bei dem Profil in Ost-West-Richtung ein Geoidundulationsunterschied von etwa 8 mm besteht, in Nord-Süd-Richtung von etwa 3.5 mm. Anhand der Punktentfernungen und dieser Geoidhöhenunterschiede lassen sich die in Richtung eines Profils entfallenden Lotabweichungskomponenten mit (3.6) und (3.7) nach [Heiskanen und Moritz 1967] bestimmen (vgl. Abbildung 3.3).

Für den Bereich der ADCP-Messung ergeben sich ε bei 1270.49 m Profillänge mit 1.79", η in Ost-West-Richtung bei 1202 m Profillänge mit -1.37" und ξ in Nord-Süd-Richtung bei einer Profillänge von 411.50 m mit -1.75". Dies sind Größenordnungen, die bei einer numerischen Auflösung des Kreiselpasses von 0.1° keine Rolle spielen und daher bei der Reduktion nicht angebracht werden müssen.

Es gilt $\eta = 0$ und $A - \alpha = 0$, womit $A = \alpha$.

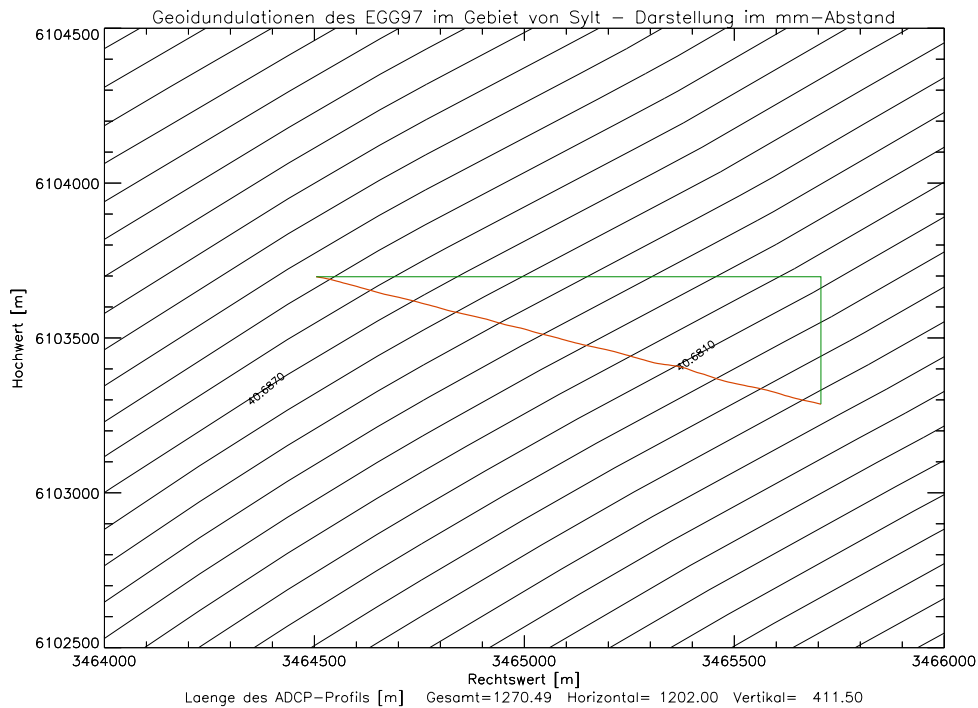


Abb. 3.2: Darstellung der Geoidundulation des EGG97 im Sylter Bereich in mm-Abständen.

$$dN = -\varepsilon \cdot ds, \quad (3.6)$$

$$\varepsilon = -\frac{dN}{ds}, \quad (3.7)$$

wobei:

- dN : Unterschied der Geoidundulation in Profilrichtung
- ds : Punktentfernung in Profilrichtung
- ε : Lotabweichungskomponente in Profilrichtung.

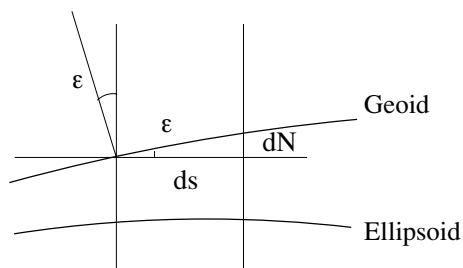


Abb. 3.3: Bestimmung der Lotabweichungskomponente in Profilrichtung anhand der Punktentfernung und der Geoidundulation.

Richtungsreduktion wegen großer Höhe des Zielpunktes

Der gemessene Winkel muss im Normalfall auch aufgrund der unterschiedlichen Höhe des Zielpunktes gegenüber dem Meeresniveau korrigiert werden. Für das Besselellipsoid gilt [Grossmann 1976]:

$$(\alpha_1 - \alpha)'' = +0.108'' \cos^2 \varphi \sin(2\alpha) h_{Z[km]}, \quad (3.8)$$

worin:

- α : ellipsoidisches Azimut des Vertikalschnittbogens
- α_1 : auf das Ellipsoid reduziertes ellipsoid. Azimut des Vertikalschnittbogens
- φ : ellipsoidische Breite
- h_Z : Höhe des Zielpunktes über dem Meeresniveau in [km].

Da sich die ADCP Zielpunkte bei maximal 30 m Tiefe und somit annähernd auf dem Meeresniveau befinden, werden die Korrekturen wegen Zielpunkthöhe so gering, dass sie nicht angebracht werden müssen. Man kann davon ausgehen, dass

$$(\alpha_1 - \alpha)'' = 0. \quad (3.9)$$

Reduktion des Vertikalschnittbogens auf die geodätische Linie

Die Beobachtung von Azimuten und Horizontalwinkeln bei einer Messung auf dem Ellipsoid erfolgt zwischen Vertikalschnittbögen. Dabei handelt es sich um den Schnitt, den der Normalschnitt eines Punktes mit dem Ellipsoid bildet. Die Flächennormalen zweier Ellipsoidpunkte verlaufen im allgemeinen windschief zueinander (aufgrund unterschiedlicher Krümmungen), sodass die Gegennormalschnitte nicht zusammenfallen. Die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten wird nicht durch die Vertikalschnittbögen, sondern durch die sog. geodätische Linie dargestellt. Der im Feld gemessene Winkel ist beim Übergang zur geodätischen Linie zu reduzieren.

Nach [Grossmann 1976] gilt:

$$(\alpha_2 - \alpha_1)'' = -0.028'' \cos^2 \varphi \sin(2\alpha) \left(\frac{s_{[km]}}{100}\right)^2, \quad (3.10)$$

worin:

- α_2 : Azimut der geodätischen Linie
- α_1 : auf Ellipsoid reduziertes ellipsoid. Azimut des Vertikalschnittbogens
- φ : ellipsoidische Breite
- α : ellipsoidisches Azimut des Vertikalschnittbogens
- s : Entfernung Standpunkt- Zielpunkt in [km].

Auch hier gilt, dass die Entfernung der Zielpunkte bei der ADCP-Messung so gering ist (bei 30 m Wassertiefe und einem Öffnungswinkel von 20° ergibt sich nach einer Seite eine Horizontalentfernung von etwa 11 m), dass es nicht nötig wird, eine Korrektur anzubringen. Die Differenz $(\alpha_2 - \alpha_1)''$ ergibt sich in der Größenordnung von Bruchteilen einer Bogensekunde. Es kann davon ausgegangen werden, dass $(\alpha_2 - \alpha_1)'' = 0$.

3.1.2 Reduktion vom Ellipsoid auf die Abbildungsebene

Meridiankonvergenz

Für geodätische Anwendungen wird in der Regel anstelle des geographischen Koordinatensystems das Gauß-Krüger-Koordinatensystem (im folgenden mit GK bezeichnet) verwendet. Bei diesem Koordinatensystem handelt es sich um ein ebenes konformes Koordinatensystem, das in der deutschen Landesvermessung benutzt wird. Dieses System teilt die Erde in 3° breite Streifen, sodass jeder dritte Meridian ein Mittelmeridian ist. Die Koordinaten dieses Systems werden in Rechts- und Hochwert angegeben. Bei dem Rechtswert ist dabei die Entfernung zum Mittelmeridian gemeint, dessen Rechtswert mit 500 000 m festgelegt ist, damit links des Meridians gelegene Punkte keine negativen Rechtswerte bekommen. Der Hochwert gibt die Entfernung zum Äquator an.

Die mit dem Kreisels gemessenen Winkel beziehen sich auf die astronomische Nordrichtung und bestimmen das geographische Azimut, welches nicht mit dem auf Gitternord bezogenen Azimut übereinstimmt. Um dieses zu erhalten, muss die Meridiankonvergenz C wie folgt berücksichtigt werden.

Die Meridiankonvergenz variiert mit dem Abstand vom Hauptmeridian λ_0 und berechnet sich nach [Grossmann 1976] zu

$$C = l \sin \varphi + \frac{l^3}{3\rho^2} \sin \varphi \cos^2 \varphi (1 + 3\eta^2), \quad (3.11)$$

mit

$$\begin{aligned} \eta^2 &= \frac{e^2 \cos^2 \varphi}{1 - e^2}, \\ l &= \lambda - \lambda_0, \\ e^2 &= \frac{a^2 - b^2}{a^2}, \end{aligned}$$

wobei:

- C : ebene Gaußsche Meridiankonvergenz [Grad]
- l : Entfernung vom Hauptmeridian [Grad]
- λ : ellipsoidische Länge [Grad]
- φ : ellipsoidische Breite [Grad]
- λ_0 : Hauptmeridian des GK-Streifens (hier 9°) [Grad]
- a : große Halbachse des Ellipsoides [m]
- b : kleine Halbachse des Ellipsoides [m]
- e : 1. numerische Exzentrizität
- ρ : Umrechnungskonstante ($\frac{180^\circ}{\pi}$)
- η^2 : ellipsoidische Hilfsgröße.

Die Meridiankonvergenz wurde für je ein Koordinatenpaar am West- bzw. Ostende eines der ADCP-Profile berechnet (vgl. Tabellen 3.1 und 3.2). Die Meridiankonvergenz erreicht mit -0.44° eine Größenordnung, deren erste Nachkommastelle bei einer numerischen Auflösung des Kreisels von 0.1° relevant ist und daher an die Messwerte angebracht werden muss. Die zweite Nachkommastelle ist irrelevant, sodass für das gesamte Profil mit einer Meridiankonvergenz von -0.4° gerechnet werden kann.

Tab. 3.1: Position eines westlichen Punktes auf dem ADCP-Profil.

	WGS84	DHDN	Gauß-Krüger [m]
λ / GK-Rechts	8°27'4.5''	8°27'8.08''	3465004.5
φ / GK-Hoch	55°3'33.42''	55°3'39.56''	6103524.9
C	-0.44°		

Tab. 3.2: Position eines östlichen Punktes auf dem ADCP-Profil.

	WGS84	DHDN	Gauß-Krüger [m]
λ / GK-Rechts	8°27'46.36''	8°27'49.95''	3465745.6
φ / GK-Hoch	55°3'25.27''	55°3'31.41''	6103267.2
C	-0.44°		

Richtungsreduktion vom Ellipsoid in die GK-Abbildung

Um die gemessenen Richtungen T der gekrümmten ellipsoidischen Strecke (auf dem Ellipsoid) in Abbildungen richtig darstellen zu können, muss eine Richtungsreduktion vorgenommen werden, aus der die Richtung t der Horizontalstrecke in der Abbildungsebene (Gauß-Krüger) resultiert.

Für Überschlagsrechnungen in unseren Breiten gilt nach [Grossmann 1976]:

$$(T - t)'' = \frac{y_m \Delta x}{2r^2} \rho \approx (y_m \Delta x / 400)'' , \quad (3.12)$$

wobei:

- T : ellipsoidischer Richtungswinkel
- t : Richtungswinkel in der GK-Ebene
- y_m : mittlerer Rechtswert [km] im GK-System - 500 km
- Δx : Differenz der Hochwerte von Zielpunkt - Startpunkt [km]
- r : Erdradius
- ρ : Umrechnungskonstante $(180 \cdot 60 \cdot 60 / \pi)$.

Da bei der ADCP-Strömungsmessung die Ziele, zu denen die Richtung bestimmt wird, mit einer Wassertiefe von höchstens 30 m nicht weiter als 11 m entfernt sind, muss diese Korrektur nicht angebracht werden. Bei dieser Geometrie ergibt sich eine Abweichung von $0.0009''$. Diese werden nicht als Verbesserung an die Kreiselmessungen angebracht. Die Anbringung ist nur erforderlich, wenn Genauigkeitsanforderungen von < 1 mgon an die Richtungsmessung bestehen und bei der Verwendung längerer Strecken (> 1 km).

3.1.3 Fehlweisung des Kreisels

Mit der Fehlweisung eines Kreisels wird der Winkel bezeichnet, den rechtweisend Nord (rwN) mit der Kreiselmessungsbildung bildet [Albrand 2001; von Fabek 1980]. Für die Bestimmung des rechtweisenden Kurses muss der abgelesene Kreiselmessungswert mit der Kreiselfehlweisung verbessert werden. Diese setzt sich aus dem konstanten geräte- und aufstellungsbedingten Kreiselmessungsfehler A und dem kurs-, geschwindigkeits- und breitenabhängigen Fahrtfehler zusammen.

Das Kreisel-A (KrA) beinhaltet den konstanten Teil der Kreiselabweichung und hat die Bedeutung eines Nullpunkts- oder Aufstellungsfehlers, der durch geeignete Ausrichtung auf null gebracht werden kann. Vom Kreisel-A abgedeckt wird im Normalfall auch der Kollimationsfehler, welcher durch einen fehlerhaften Teilkreis entsteht. Um ihn zu vermeiden, muss der NS-Strich in Richtung des Gesamtdrehimpulses des Kreisels ausgerichtet sein.

Bei einer Kompasskontrolle an Bord lässt sich jedoch durch Differenzbildung lediglich das Kreisel-R ermitteln (3.13), da nicht beurteilt werden kann, welche Ausschläge die Anzeige des Kompasses noch überlagern. Das Kreisel-R ist der jeweils beobachtete Anzeigefehler, welcher alle Kreiselbeeinflussungen enthält (außer dem Fahrtfehler), die während der Fahrt auftreten. Aus ihm kann durch arithmetische Mittelbildung das Kreisel-A bestimmt werden.

$$\text{KrR} = \text{rwK} - \text{KrK} - \text{Ff} = \text{Fw} - \text{Ff}, \quad (3.13)$$

mit

KrR:	Kreisel-R
rwK:	rechtweisender Kurs
KrK:	Kreiselkompasskurs
Ff:	Fahrtfehler
Fw:	Fehlweisung.

Der sogenannte Fahrtfehler kommt durch die Überlagerung der Erddrehung mit der Schiffsbewegung zustande und ist breiten-, richtungs- und geschwindigkeitsabhängig. Bei Kursen parallel mit oder gegen die Erddrehung (90° oder 270°) ist der Fahrtfehler = 0. Bei Nordkursen verschiebt sich die Resultierende aus Erddrehung und Schiffsbewegung nach Westen, bei Südkursen nach Osten. Die Formel zur Bestimmung des Fahrtfehlers lautet nach [Albrand 2001]:

$$\sin \text{Ff} = -\frac{v_G \cos \text{KrK}}{v_0 \cos \varphi} = -\frac{v_G \cos \text{KrK}}{902.46 \cos \varphi}, \quad (3.14)$$

wobei:

KrK:	Kreiselkompasskurs
φ :	ellipsoidische Breite
Ff:	Fahrtfehler
v_G :	Schiffsgeschwindigkeit [kn]
v_0 :	Bahngeschwindigkeit eines erdfesten Punktes am Äquator [kn].

Es handelt sich beim Fahrtfehler um einen kleinen Winkel, so dass $\sin \delta_{Kr} \approx \delta_{Kr} \frac{\pi}{180^\circ}$ gesetzt werden kann:

$$\text{Ff} = -0.0635 v_G \frac{\cos \text{KrK}}{\cos \varphi}. \quad (3.15)$$

Bei der ADCP-Messung wurden Profile mit Kursen von $267 \dots 291^\circ$ und $95 \dots 105^\circ$ und Geschwindigkeiten von $3 \dots 7$ kn (vgl. Tabelle 2.2) gefahren. Daher ergeben sich für die Fahrtfehlerberichtigung lediglich Winkel von -0.04° bis 0.03° .

3.1.4 Zusammenfassung der Azimutkorrektur

Die Messgenauigkeit des Arma-Brown Gyro-Kompasses Mk.5 wird mit $\pm 1^\circ$ (1σ) angegeben. Aufgrund der Größenordnung der verschiedenen Korrekturen ergibt sich, dass nur die Meridiankonvergenz mit -0.4° relevant ist und an der gemessenen Richtung angebracht werden muss. Es ergibt sich als korrigierte Richtung:

$$K = A - C, \quad (3.16)$$

wobei:

- K : Richtungswinkel zwischen Gitternord und der Kursrichtung
- A : Kreiselkompassrichtung
- C : ebene Meridiankonvergenz.

3.2 Echolotung

3.2.1 Messprinzip

Das Messprinzip der Echolotung beruht auf der Messung der Laufzeit eines Schallsignals. Die Tiefe lässt sich nach (3.17) berechnen:

$$d = \frac{1}{2} c t, \quad (3.17)$$

mit:

- d : Tiefe [m]
- c : Wasserschallgeschwindigkeit [m/s]
- t : Laufzeit [s].

Das Echolot misst den Abstand zwischen Echolotschwinger und dem Meeresboden. Um die Wassertiefe zu erhalten, muss daher die Eintauchtiefe des Schwingers zur gemessenen Tiefe addiert werden. Der Betrag dieses Additionswertes kann im Echolot eingestellt und automatisch berücksichtigt werden. Mit der Tiefe zunehmender Wasserdruck muss erst ab etwa 100 m Wassertiefe beachtet werden. In flacheren Tiefenbereichen wie z. B. im Lister Tief (maximale Wassertiefe auf dem ADCP-Profil 30 m) spielt er keine relevante Rolle.

Die Schallgeschwindigkeit muss bei der Echolotung so genau wie möglich bekannt sein, um die Tiefe berechnen zu können. Hierzu wird für den Einsatz im Flachwasserbereich vor Ort ein Barcheck durchgeführt. Bei diesem wird eine Barcheckplatte auf bestimmte Solltiefen unter dem Schwinger abgelassen und die Tiefe mit dem Echolot gemessen. Aus den Differenzen zwischen Soll und Ist kann dann die Schallgeschwindigkeit berechnet werden. Das Navisound 2000 verfügt über eine Funktion zur Durchführung des Barchecks. Es ergab sich eine Schallgeschwindigkeitseinstellung von 1512 m/s.

3.2.2 Verbesserung der Schallgeschwindigkeit

Zusätzlich zum Barcheck wurde die Bestimmung der Wasserschallgeschwindigkeit mittels einer CTD-Sonde durchgeführt. Aus deren Messgrößen Druck, Salzgehalt und Wassertemperatur wird die Schallgeschwindigkeit berechnet. Der ADCP ist in der Lage, die zu verwendende Schallgeschwindigkeit selbst zu bestimmen, in dem er die Temperatur misst und aus dieser und einem konstanten Salzgehalt (in der Konfigurationsdatei einstellbar) die Schallgeschwindigkeit berechnet. Die unterschiedlichen Methoden ergaben verschiedene Messwerte, die zusammen mit den Berechnungsergebnissen der Tabelle 3.3 zu entnehmen sind. Die Berechnung erfolgte für CTD-Sonde und ADCP mit der Schallgeschwindigkeitsformel [Urick 1983]:

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016d, \quad (3.18)$$

wobei:

- c : Wasserschallgeschwindigkeit
- T : Wassertemperatur [° Celsius]
- S : Salzgehalt [PSU]
- d : Tiefe [m].

Tab. 3.3: Berechnung der Schallgeschwindigkeit.

Bestimmung durch	Temperatur [°]	Salzgehalt [PSU]	Tiefe [m]	Schallgeschw.[m/s]
Barcheck			5	1512
CTD	19.8	28.5	25	1514
ADCP	19.4	30	25	1514

Ein Fehler von 1 m/s hat eine Verfälschung der gemessenen Tiefe von 1 cm/15 m zur Folge. Im Messgebiet handelt es sich um einen Tiefenbereich von bis zu 30 m, d. h. es kann von einer Verfälschung der Tiefe um etwa 2 cm ausgegangen werden.

3.2.3 Einfluss der Hangneigung

Bei der Messung von Tiefen nimmt der Schwinger das erste zurückkommende Echo zur Bestimmung der Tiefe an. Aufgrund des Öffnungswinkels des Schwingers wird die Tiefe nicht punktuell gemessen, sondern es bildet sich ein sog. „Footprint“ am Gewässerboden, aus dem das Echo zurückkommt (Abbildung 3.4).

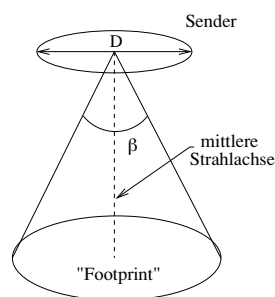


Abb. 3.4: Messung einer fehlerhaften Tiefe bei vorhandener Hangneigung der Einstrahl-Echolotungsmessung mit Entstehung eines Footprints, in Anlehnung an [Bruns 2001].

Der Schallstrahl des NaviSound 2000 deckt mit seinem Öffnungswinkel von 6° bei einer Tiefe von 30 m eine Fläche von 7.70 m^2 des Gewässerbodens ab. Bei ansteigendem oder abfallendem Gebiet kommt es zu Fehlmessungen, da das erste zurückkommende Echo nicht das Echo aus dem Bereich des vertikal ausgesendeten Schallstrahls ist (Abbildung 3.5).

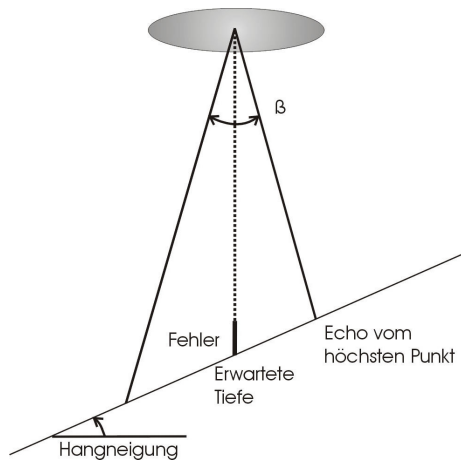


Abb. 3.5: Fehlerhafte Tiefenmessung bei vorhandener Hangneigung — die Tiefe wird zu flach gemessen, in Anlehnung an [Bruns 2001].

Die Größe des Hangneigungsfehlers ist vom Öffnungswinkel des Schwingers sowie der Stärke der Hangneigung abhängig. Je steiler der Hang und je größer der Öffnungswinkel, um so größer die mögliche Verfälschung durch Hangneigungsfehler. Die Tiefen werden zu klein gemessen. Um diesen Fehler zu korrigieren, muss zunächst die Hangneigung bestimmt werden (Abbildung 3.6).

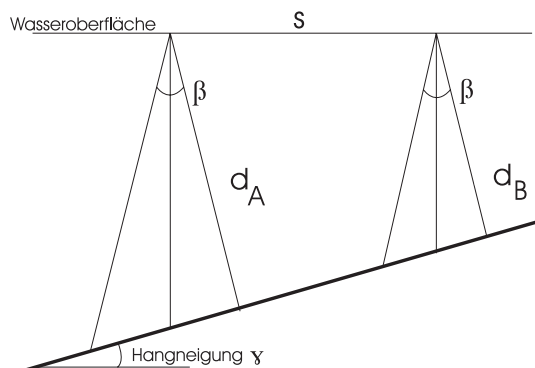


Abb. 3.6: Bestimmung der Hangneigung über den Tiefenunterschied bei der Messung an zwei Positionen, in Anlehnung an [Bruns 2001].

Die Berechnung erfolgt nach

$$\tan \gamma = \frac{\cos \frac{\beta}{2} (d_A - d_B)}{s - \sin \frac{\beta}{2} (d_A - d_B)}, \quad (3.19)$$

worin:

- γ : Hangneigungswinkel (gegen die Horizontale)
- β : Öffnungswinkel des Schwingers
- d_A : gemessene Tiefe am Punkt A
- d_B : gemessene Tiefe am Punkt B
- s : Strecke zwischen den beiden Messpositionen.

Mit der Hangneigung γ kann schließlich der Hangneigungsfehler berechnet werden [Bruns 2001]:

$$H_f = d_m \left(\cos \frac{\beta}{2} + \sin \frac{\beta}{2} \tan \gamma - 1 \right), \quad (3.20)$$

mit

H_f : Hangneigungsfehler [m]
 d_m : gemessene Tiefe [m].

3.2.4 Fehlereinfluss durch Schiffsbewegung

Bei Beschleunigung des Schiffes sowie Rollen und Stampfen durch Wellengang kommt es zu einer Verschwenkung der Lotrichtung des Echolotes. Die Tiefenmessergebnisse werden falsch, da Tiefen an Stellen gemessen werden, die nicht lotrecht unter dem Schwinger liegen. Besonders große Auswirkungen hat hierbei eine starke Beschleunigung des Schiffes in Fahrtrichtung in Verbindung mit einer Lagerung des Schwingers außerhalb des Schiffsschwerpunktes (beispielsweise am Bug, Abbildung 3.7) .

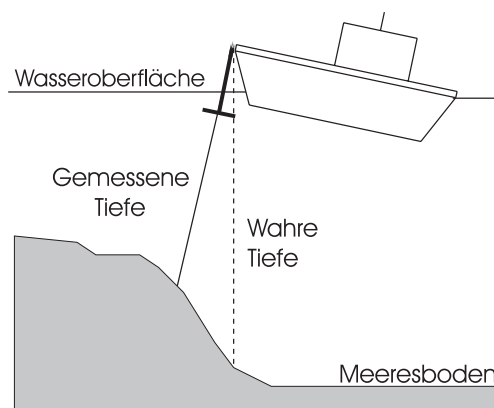


Abb. 3.7: Fehlerhafte Tiefenmessung durch Verschwenkung der Lotrichtung des Echolotes bei Schiffsbewegung, in Anlehnung an [Bruns 2001].

An die Echolotung wurden dahingehend keine Korrekturen angebracht, da sich der Schwinger annähernd im Schiffsschwerpunkt befand und während der Meßfahrt große Beschleunigungen vermieden wurden. Auch Korrekturen wegen Seegang wurden nicht angebracht, da die Messungen bei ruhiger See stattfanden. Die Beeinflussung der Tiefenmessungen durch Sunk und Schwall vorbeifahrender Schiffe muss hier keine Beachtung finden, da die Messungen nicht bei starkem Schiffsverkehr oder in extrem flachen Gebieten durchgeführt wurden.

3.2.5 Beschickungsfehler

Um die während der beiden Messtage ermittelten Tiefen des ADCP-Profiles miteinander vergleichen zu können, müssen die Messwerte beschickt werden. Unter Beschickung wird die Berücksichtigung der Wasserstandshöhe am Lotungsort zum Lotzeitpunkt gegenüber einem bestimmten Bezugsniveau (beispielsweise NN oder SKN) verstanden (Abbildung 3.8).

Die Berechnung der wahren Tiefen erfolgt nach

$$d_b = d_m + d_e - St - G, \quad (3.21)$$

mit:

- d_b : beschickte Tiefe
- d_m : gemessene Tiefe
- d_e : Eintauchtiefe des Schwingers
- St : Stauanteil der Wassertiefe
- G : Gezeitenanteil der Wassertiefe.

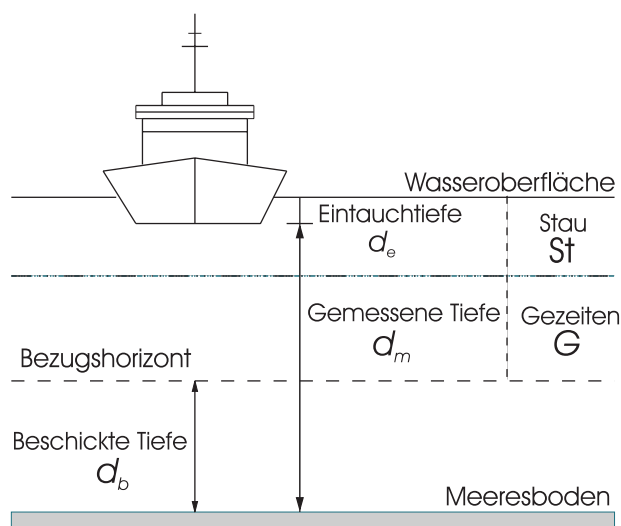


Abb. 3.8: Konventionelle Methode der Beschickung von Tiefendaten, in Anlehnung an [Goffinet 2001].

Im allgemeinen dominiert im Bereich der deutschen Nordseeküste die Beschickung nach Wasserstanderrechnungskarten (WEK), welche eine Berücksichtigung der Laufzeit der Tidewelle ermöglichen [Rosengarten 1987; Goffinet 2001]. Diese basieren auf Pegel-Langzeitbeobachtungen, welche ständig aktualisiert werden.

Der Verlauf der Gezeiten bewirkt eine Verschiebung der Tidekurve und erzeugt so unterschiedliche Wasserstände an Pegel und Lotungsort. Zur optimalen Modellierung der Wasseroberfläche ist eine ausreichende Anzahl gleichmässig verteilter Pegel nötig. Findet die Echolotung in der Nähe eines Pegels statt (z.B. in Häfen, Flüssen), kann der Beschickungswert am Pegel unmittelbar angewandt werden, wenn man davon ausgeht, dass die Korrektur am Lotungsort gleich ist.

Für die Beschickung der Daten wurde der Pegel im Hafen von List benutzt, dessen Entfernung zum Westende des ADCP-Profiles 5.5 km, zum Ostende 4.8 km beträgt. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Korrektur am Lotungsort mit dem Beschickungswert des Pegels übereinstimmt. Andere

Pegeldaten standen jedoch nicht zur Verfügung. Nach [Fanger u.a. 1998] ist die Tidewelle etwa 15 bis 30 Minuten früher am Messgebiet als am Pegel List. Dieser etwa halbstündige Versatz der Tide wurde bei der Beschickung in Form einer Verschiebung der Zeitpunkte der Pegeldaten um eine halbe Stunde berücksichtigt.

Da mit den Echolotungen des gesamten Messgebietes (deren Ausarbeitung nicht Bestandteil dieser Arbeit sind) lediglich eine Testkarte erzeugt werden soll, deren Inhalt nicht mit den Tiefen vorhergehender oder nachfolgender Messungen verglichen wird und deren absolute Tiefengenauigkeit daher nicht von großer Bedeutung ist, wurde auf die Beachtung des Tideunterschiedes zwischen Profilanfang und Profilende in Folge der während der Profilfahrt verstrichenen Zeit verzichtet. Greift man die Tiefenunterschiede aus der Abbildung 2.4 ab, ergibt sich innerhalb eines Meßprofiles für die Ebbphase eine maximale Änderung von etwa 15 cm, bei der Flutphase von etwa 28 cm während einer Profilfahrt. Für die Erzeugung einer gültigen Tiefenkarte ist die Beachtung dieser Unterschiede unerlässlich.

Im Rahmen dieser Arbeit findet die Testkarte der Tiefen nur Verwendung zur Bestimmung der ungefähren Lage der Sandwellenkämme, Tiefenungenauigkeiten in der Größenordnung von 1 m spielen dabei keine große Rolle. Für die Echolotungen des ADCP-Profiles ist die Beschickung ohnehin nicht relevant, da es nicht um Tiefenmessungen im Bezug auf einen Horizont geht, sondern nur um in-situ Vergleiche.

4 ADCP-STRÖMUNGSMESSUNGEN

Das Akronym ADCP steht für Acoustic Doppler Current Profiler. Es handelt sich um ein Strömungsmessgerät, welches das Prinzip des Doppler-Effektes zur Geschwindigkeitsmessung nutzt. Mit einem schiffsgestützten ADCP lassen sich Relativgeschwindigkeiten des Wassers gegenüber dem Schiff messen, aus denen sich anschließend die Absolutgeschwindigkeit des Wassers ermitteln läßt. Im folgenden Kapitel werden die Funktionsweise eines ADCP's und die technischen Daten dargestellt [Gordon 1996; Simpson 2001]. Abschließend wird das Format der erzeugten Rohdatendateien erläutert.

4.1 Funktionsprinzip

4.1.1 Doppler-Effekt

Bei dem zur Strömungsmessung benutzten Doppler-Effekt handelt es sich um eine Frequenzverschiebung, die bei Relativbewegung zwischen Sender und Empfänger zustande kommt. Als Beispiel mögen die Wellen eines Sees dienen (Abbildung 4.1).

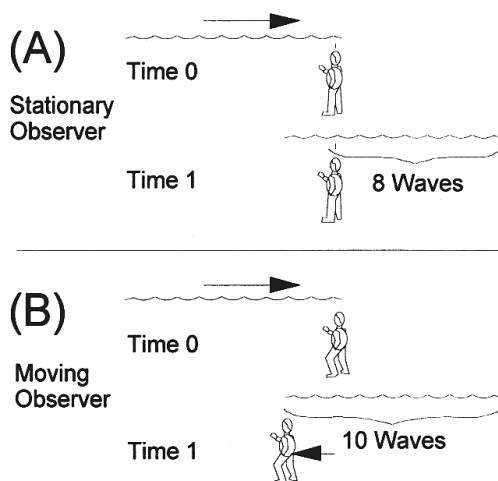


Abb. 4.1: Doppler-Effekt: Einen in Richtung der Wellen laufenden Beobachter passieren mehr Wellen als einen still stehenden [Simpson 2001].

Am Ufer eines Sees stehend passieren einen stehenden Beobachter in einem bestimmten Zeitabschnitt acht Wellen. Bewegt sich der Beobachter jedoch auf die Wellen zu, passieren in dem selben Zeitabschnitt mehr als acht Wellen, die Frequenz der Wellen erscheint höher. Die Frequenz erscheint niedriger, wenn sich der Beobachter mit den Wellen mitbewegt. Diese Frequenzverschiebung wird durch den Doppler-Effekt verursacht. Die Differenz zwischen der stehend gehörten Frequenz und der Frequenz, die in Bewegung wahrgenommen wird, bezeichnet man als Dopplerverschiebung (4.1).

$$F_d = F_s \frac{V}{c}, \quad (4.1)$$

hierin sind:

- F_d : Frequenz der Dopplerverschiebung
- F_s : Frequenz in Ruhelage
- V : relative Geschwindigkeit zwischen Schallquelle und -empfänger
- c : Schallgeschwindigkeit (beim ADCP die Wasserschallgeschwindigkeit).

Der ADCP nutzt den Doppler-Effekt, indem er Schall mit einer bestimmten Frequenz aussendet und den von im Wasser befindlichen kleinen Partikeln oder Plankton reflektierten Schall wieder empfängt. Die Bewegung dieser Partikel entspricht im Mittel der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit des Wassers.

Bewegen sich die Partikel vom ADCP weg, ist der Schall, den diese empfangen, zu einer niedrigeren Frequenz dopplerverschoben. Diese Verschiebung ist proportional zur relativen Geschwindigkeit zwischen ADCP und Partikel. Die Frequenz des Echos, das vom ADCP empfangen wird, ist zweifach dopplerverschoben (Abbildung 4.2), da die Verschiebung aufgrund der Entfernungsänderung des Partikels auf Hin- und Rückweg des Schalls auftritt (4.2):

$$F_d = 2F_s \frac{V}{c}. \quad (4.2)$$

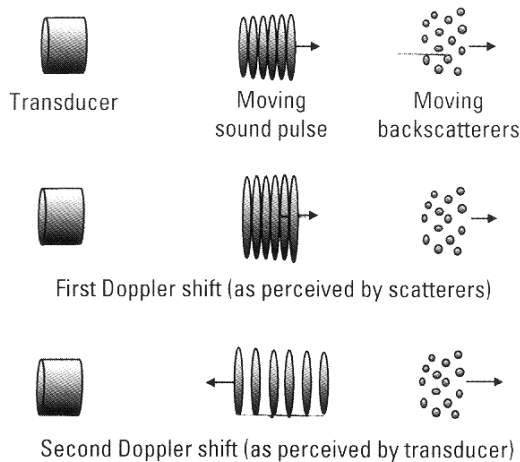


Abb. 4.2: Eine doppelte Frequenzverschiebung des Schallechos ergibt sich durch die Bewegung der reflektierenden Partikel [Simpson 2001].

Der Doppler-Effekt tritt nur auf, wenn sich Schallsender und Empfänger radial bewegen, sich also ihre Entfernung zueinander ändert. Eine Tangentialbewegung ändert zwar die Richtung zwischen Quelle und Empfänger, hat aber keine Dopplerverschiebung zur Folge. Die Verschiebung kann auf die radiale Komponente beschränkt werden, und es ergibt sich Θ_1 als Winkel zwischen relativer Bewegungsrichtung des Rückstreuers und dem ausgesandten Schallstrahl (Abbildung 4.3):

$$F_d = 2F_s \frac{V}{c} \cos \Theta_1. \quad (4.3)$$

Betrachtet man die Schallrückstreuung eines einzigen Partikels, so zeigt sich, dass bei radialer Bewegung des Partikels bedingt durch die Entfernungsänderung eine Laufzeitverzögerung (Ausbreitungsverzögerung) des reflektierten Strahles auftritt. Die vom Partikel zurückgelegte Strecke sowie seine Geschwindigkeit können berechnet werden, wenn sowohl die Schallgeschwindigkeit als auch die Wartezeit zwischen Aussenden der einzelnen Impulse bekannt ist und die Ausbreitungsverzögerung gemessen werden kann.

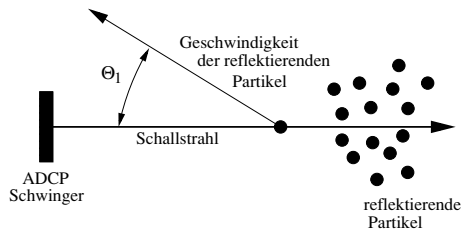


Abb. 4.3: Vom ADCP wird nur die Bewegung der Partikel parallel zum jeweiligen akustischen Strahl gemessen, in Anlehnung an [Gordon 1996].

4.1.2 Ausbreitungsverzögerung

Zur Messung der Ausbreitungsverzögerung kann die Phase des Echos benutzt werden. Durch das Auftreten einer Ausbreitungsverzögerung bei der Reflektion kommt es zu einer Frequenzverschiebung und somit zur Änderung der Phase (Abbildung 4.4). Da das Partikel sich während einer Impulsdauer bewegt, wird das Echo gestreckt und die Dopplerverschiebung bewirkt.

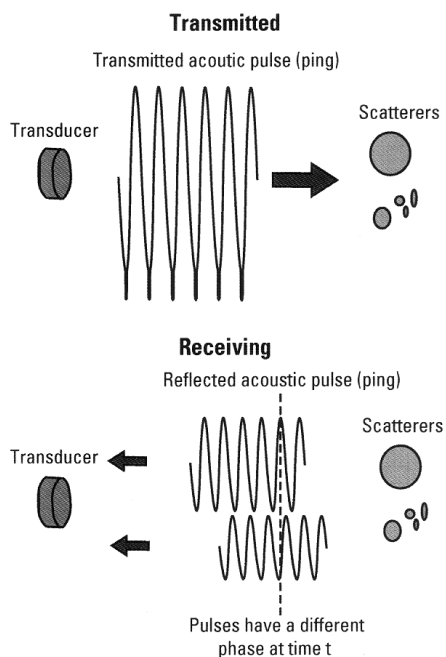


Abb. 4.4: Darstellung der Phasenänderung, die sich aufgrund der Größe und der Geschwindigkeit der reflektierenden Partikel ergibt [Simpson 2001].

Der hier betrachtete ADCP von RDInstruments bedient sich der Phasenmessung zur Bestimmung der Ausbreitungsverzögerung, da dies eine genauere Feststellung der Dopplerverschiebung zulässt als die direkte Messung der Frequenzverschiebung.

Das Problem der Phasenmessung ist die Bestimmung der Mehrdeutigkeit, die sich ergibt, wenn der Bereich von $0 \dots 360^\circ$ überschritten wird. Phasen von 40° und 400° entsprechen einander (Abbildung 4.5). Verdeutlicht werden kann das Problem am Beispiel einer Uhr [Gordon 1996]. Wenn eine Uhr nur einen Minutenzeiger hätte, könnte man die Zeit mit der Genauigkeit einer Minute messen, hätte aber nicht die Möglichkeit, die Stunde zu bestimmen. Wenn andererseits eine Uhr nur mit einem Stundenzeiger ausgestattet wäre, könnte nur eindeutig die Stunde bestimmt werden, die Zeitgenauigkeit wäre jedoch viel größer als eine Minute. Um präzise Geschwindigkeitsmessungen zu erhalten, ist es nötig, dass die Phasenmessungen ebenso sensitiv gegenüber Änderungen in der Geschwindigkeit sind, wie der Minutenzeiger der Uhr gegenüber Änderungen der Zeit.

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Mehrdeutigkeit ist, die Zeit zwischen den Impulsen so kurz zu halten, dass das reflektierende Partikel nicht die Möglichkeit hat, eine große Entfernung zurückzulegen

Phase Angle and Time Dilation

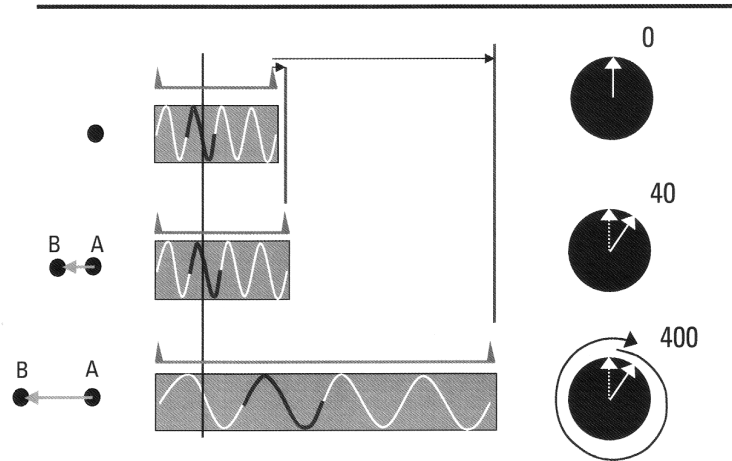


Abb. 4.5: Beschreibung der Ausbreitungsverzögerung verglichen mit dem entstehenden Phasenwinkelunterschied [Simpson 2001].

und so die Phasenänderung möglichst gering zu halten. Eine höhere Genauigkeit der Mehrdeutigkeitslösung wird jedoch durch die Verwendung von langen Impulsen erreicht.

Eine Methode zur Lösung von Mehrdeutigkeiten ist die Autokorrelation. Dabei handelt es sich um eine mathematische Methode, bei der das Signal mit sich selbst moduliert wird, allerdings um ein beliebiges und variables Zeitintervall versetzt. Das Ergebnis ist eine gute oder schlechte Korrelation. Bei hoher Korrelation sehen die Echos gleich aus. Bei dem ADCP von RDInstruments wird die Autokorrelationsmethode benutzt, um aus komplizierten Messechos (viele Echos von mehreren Partikeln werden kombiniert in einem einzigen Echo empfangen) die Geschwindigkeit zu erhalten (Abbildung 4.6).

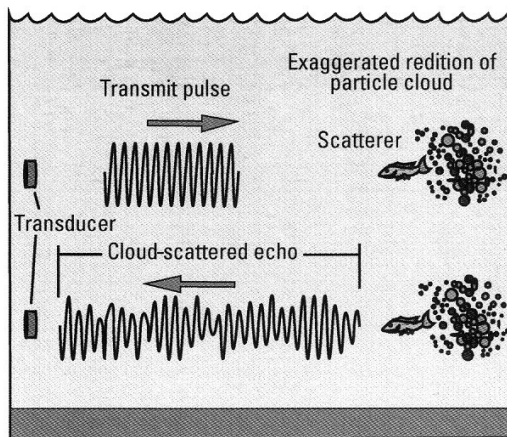


Abb. 4.6: Darstellung eines Echos, wie es von einer Partikel'wolke' reflektiert wird; das Signal ist verrauscht, da Echos mehrerer Partikel kombiniert in einem Echo empfangen werden [Simpson 2001].

4.1.3 Schallstruktur

Die Senderqualität ist entscheidend für die Datenqualität. Die aktiven Elemente des Schwingers sind piezoelektrische Keramikplatten, die sich unter Einfluß eines elektrischen Feldes ausdehnen oder zusammenziehen (abhängig von der Polarität der Spannung). Das elektrische Feld wird über dünne Silberschichten auf der Oberfläche der Keramik angebracht. ADCP's stellen hohe Anforderungen an ihre Sender: sie müssen gerichtet (schmale Strahlbreiten, unterdrückte Nebenkeulen) und leistungsfähig sein.

Die Schallstruktur des Schwingers zeigt, dass die Abstrahlstärke des gesendeten Schalles mit Entfernung vom Schwinger eine Funktion des Winkels ist. Der Winkel wird relativ zur Senderachse (Linie von der Sendermitte senkrecht zu der Senderoberfläche) gemessen. Die Schallstruktur wird charakterisiert durch die Hauptkeule, die die meiste Energie enthält und die Nebenkeulen, die in andere Richtungen weisen als die Hauptkeule. Außerhalb 15° von der Hauptkeule werden die Nebenkeulen (typischerweise 35 dB oder mehr relativ zur Hauptkeule) unterdrückt.

Die Größe der Nebenkeulen hängt sowohl von der Größe des Schwingers als auch von den Gegebenheiten bei der Herstellung des Schwingers ab. Je größer der Schwinger bei einer gegebenen Frequenz ist, desto schmaler wird der Strahl, und die Nebenkeulen werden unterdrückt. Es gibt jedoch auch Nebenkeulen, die nicht von der Schwingergröße abhängen sondern aus der Vibrationsart der piezoelektrischen Keramik resultieren. Nebenkeulen sind normalerweise bei etwa 40° von der Hauptkeule aus zu finden und können dominante Fehlerquellen sein, da sie Interferenzen mit dem Signal der Hauptkeule erzeugen können. Dazu kommt es, wenn das Signal der Nebenkeule den Boden vor dem Signal der Hauptkeule erreicht und somit die Information des Bodensignals aus der Nebenkeule mit der Wassergeschwindigkeitsinformation aus der Hauptkeule überlagert wird und zu einer Verfälschung derselben führt. Der Messbereich wird eingeschränkt.

4.1.4 Sprungschichten

Existieren in der Wassersäule große Dichteunterschiede, handelt es sich um einen geschichteten Wasserkörper. Die Grenzen zwischen den einzelnen Schichten werden als Sprungschichten bezeichnet. Es wird zwischen horizontalen und vertikalen Sprungschichten unterschieden. Horizontale Schichtungen entstehen beispielsweise häufig in Seen, in denen sich die obere erwärmte Wasserschicht von der kalten unteren Wasserschicht abgrenzt. Vertikale Sprungschichten können z. B. bei Einfluss von Flüssen ins Meer zustande kommen, wenn das wärmere Flusswasser auf das Meerwasser trifft und keine Vermischung stattfindet.

Sprungschichten brechen eindringende Schallstrahlen und verändern somit ihre Richtung. Sehr starke Sprungschichten im Wasser können eine Totalreflexion zur Folge haben, sodass ein starkes Echo entsteht, das dem eines Bodenechos gleicht. ADCP's können meist die Sprungschichten durchdringen, da ihre Strahlen relativ steil sind und eher vertikal als horizontal weisen.

4.2 Dreidimensionale Strömungsmessung

Die bisherigen Erläuterungen bezogen sich auf einzelne Schallstrahlen, die nur in der Lage sind, die parallel zum Strahl (Beam) verlaufende Strömungskomponente zu messen. Um die Strömung in einem dreidimensionalen Geschwindigkeitsraum zu bestimmen, werden vier Schallstrahlen eingesetzt. Im folgenden wird darauf eingegangen, wie die Nordkomponente (nordwärts positiv), die Ostkomponente (ostwärts positiv), die Vertikalkomponenten (aufwärts positiv) sowie eine zusätzliche redundante Information gewonnen werden.

Ein ADCP benutzt vier in entgegengesetzte Richtungen weisende Strahlen, um die Geschwindigkeitskomponenten wahrnehmen zu können. Dabei misst jeder Strahl die Komponente der Strömung, in die er weist. Die Komponenten anderer Richtungen können über trigonometrische Beziehungen berechnet werden.

Für die Berechnung der Strömung ist es notwendig, dass die Strömungen über eine Schicht von konstanter Tiefe horizontal homogen sind, da die Strahlen die Geschwindigkeit in verschiedenen Wasserbereichen messen. Diese Voraussetzung ist normalerweise im Meer, in Flüssen und Seen erfüllt.

Die vier Schwinger sind in der sogenannten Janus-Konfiguration (benannt nach dem römischen Gott Janus, der nach beiden Seiten schaut) montiert (Abbildung 4.7). Sie sind hierbei in einem horizontalen Kreis alle 90° angeordnet und in einem bestimmten Winkel (beim verwendeten ADCP 20°) zur Vertikalen nach außen gerichtet.

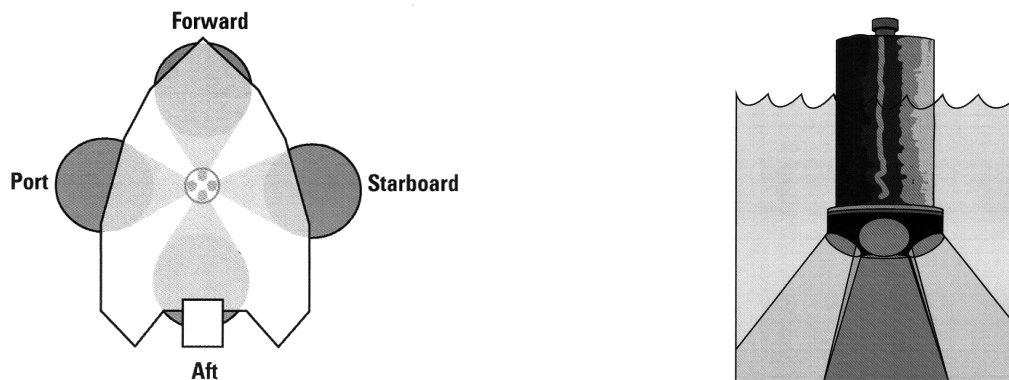


Abb. 4.7: Abbildungen eines ADCP-Strömungsmessers mit Janus-Konfiguration, wie er z.B. vom Schiff aus Verwendung findet [Simpson 2001].

Ein Paar von Schwingern (beispielsweise die Schwinger, die nach Schiffsvoraus und Achtern ausgerichtet sind) bestimmt die Horizontalkomponente und die Vertikalkomponente. Das andere entgegengerichtete Schwingerpaar (Ausrichtung nach Backbord- und Steuerbordseite) ergibt eine zweite Horizontalkomponente, die senkrecht auf der ersten steht und eine zweite Vertikalkomponente. So ergeben sich Schätzungen für zwei Horizontalkomponenten und zwei Schätzungen für die Vertikalkomponente. Aus der Differenz der beiden Schätzungen der vertikalen Geschwindigkeit lässt sich die Fehlergeschwindigkeit (error velocity) berechnen. An ihr lässt sich ablesen, ob die getroffene Annahme von horizontaler Homogenität der Strömung zutrifft. Sie dient somit als Mittel zur Beurteilung der Datenqualität. Eine Fehlergeschwindigkeit, wenn auch von kleinem Betrag existiert immer, da eine hundertprozentige Homogenität der Strömung im Geschwindigkeitsfeld in der Realität so gut wie nicht vorkommt.

4.2.1 Geschwindigkeitsprofile

Die wichtigste Eigenschaft von ADCP's ist ihre Fähigkeit, vertikale Strömungsprofile zu messen. Die Geschwindigkeitsprofile einer Vertikalen werden dabei in gleichförmige Segmente aufgeteilt, die Tiefenzellen genannt werden (vgl. Abbildung 5.2.5). Die Größe der Tiefenzellen kann vom Benutzer festgelegt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die kleinstmögliche Größe der Tiefenzellen von 25 cm verwendet.

Jede Tiefenzelle ist vergleichbar mit einem einzelnen Strömungsmesser, so dass ein ADCP-Profil im Prinzip aus den Ergebnissen einer Folge von Strömungsmessern, die einheitlich an einer Verankerung platziert sind, besteht.

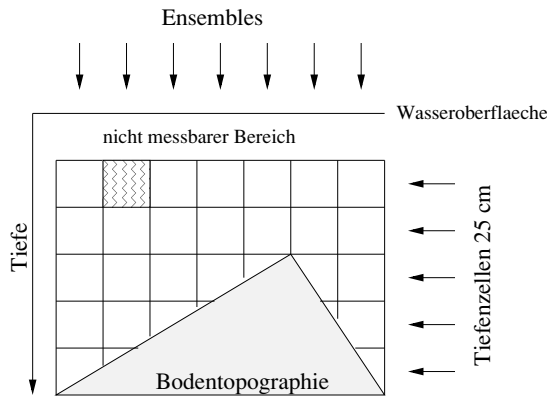


Abb. 4.8: Darstellung des Tiefenzellen-Ensembles-Systems; ein Vertikalprofil (Ensemble) besteht aus mehreren Tiefenzellen einer Größe.

Die Unterschiede zwischen den beiden Systemen sind:

1. In einem ADCP-Profil sind die Tiefenzellen immer einheitlich groß, einzelne Strömungsmesser könnten auch in einem unregelmäßigen Abstand angeordnet werden. Ein regelmäßiger Abstand der Daten erleichtert die Verarbeitung und Interpretation.
2. Der ADCP mittelt die Strömungswerte einer Tiefenzelle, während normale Strömungsmesser die Strömung nur an einem diskreten Punkt erfassen. Dadurch wird der räumliche Aliasing-Effekt reduziert, der bei der Abtastung von Zeitreihen hochfrequente wie niederfrequente Signale erscheinen lässt. Die durch gleitende Mittelbildung erreichte Glättung entfernt Geschwindigkeiten, deren vertikale Schwankungen kleiner sind als eine Tiefenzelle und reduziert somit Messungenauigkeiten.

4.2.2 Entfernungstaktung

Die Erzeugung der vertikalen Profile erfolgt durch Entfernungstaktung (range-gating) des Echosignals. Das erhaltene Signal wird in zeitlich aufeinanderfolgende Zeitsegmente geteilt, aus denen unabhängig voneinander die Strömungen berechnet werden. Echos, die aus einer größeren Entfernung zurückkommen, brauchen länger als andere, d.h. dass aufeinanderfolgende Echos zunehmend entfernteren Tiefenzellen entsprechen (Abbildung 4.9).

Nach der Aussendung des Impulses schaltet der ADCP den Sender aus und stoppt eine kurze Zeit, um das Abklingen der Vibration abzuwarten. Die Länge dieser Pause kann vom Benutzer eingestellt werden (hier wurde die minimale Einstellung von ca. 170 Mikrosekunden gewählt). Dann wird mit der Verarbeitung des Echos begonnen, das im Zeitintervall des ersten Entfernungsbereiches liegt, anschließend dem des zweiten und so weiter. Wie in Abbildung 4.9 dargestellt, erreicht bei dieser Vorgehensweise während eines Zeitbereiches nur der vordere Teil des Impulses den am weitesten vom Sender entfernten Bereich der Zelle (Bin) Eins. Echos aus dem nächstliegenden Teil der Zelle Eins kommen nur vom hinteren Teil des Impulses zurück. Die Echos, die aus dem Zentrum des als Rhombus dargestellten Zeitbereiches kommen besitzen die meiste Schallenergie, da sie vom gesamten Impuls beleuchtet wurden und müssen daher bei der Berechnung für Bereich Eins eine größere Rolle spielen. Die Berechnung des Strömungsmittels einer Tiefenzelle wird daher unter Anbringung einer Gewichtsfunktion durchgeführt.

Die Gewichtsfunktion wird bei den meisten Messsituationen angebracht; ihre Gestalt ist abhängig vom ausgesandten Impuls und der Tiefenzellengröße (Bin). Ist beispielsweise der Impuls relativ zur Tiefenzelle gesehen klein, ist die Gewichtsfunktion annähernd rechteckig mit wenig Überlappung über angrenzende Tiefenzellen. Ist der ausgesandte Impuls länger als die Tiefenzelle, kommt es zu einer größeren Überlappung und die Daten werden über die Tiefenzelle hinweg geglättet.

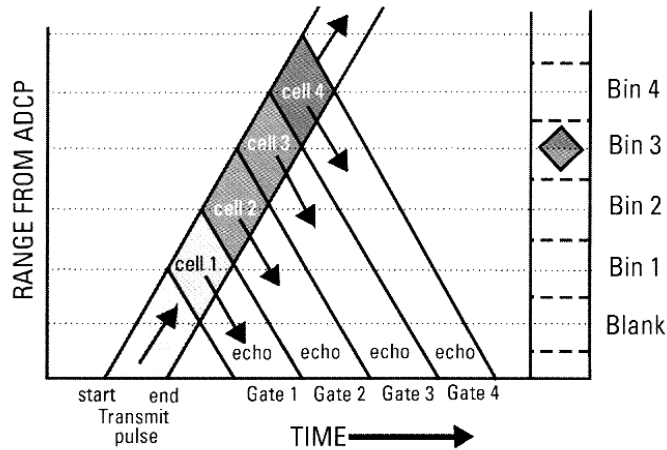


Abb. 4.9: Entfernungstaktung der empfangenen Echos; aufeinanderfolgend empfangene Echos werden zunehmend entfernteren Tiefenzellen (engl. Bins) zugeordnet [Simpson 2001].

4.3 Systematische und zufällige Fehler

Die Geschwindigkeitsbestimmung enthält zufällige Fehler und systematische Messabweichungen. Durch Mittelung der Daten kann eine Reduktion der zufälligen Fehler erreicht werden, da diese von einem Aussenden des Schallstrahles (Ping) zum nächsten unkorreliert sind. Die Standardabweichung des Mittelwertes reduziert sich mit der Wurzel der Anzahl der Pings. Ab einer bestimmten Anzahl von Mittelungen werden die zufälligen Fehler kleiner als die systematischen Fehler und eine weitere Reduzierung überflüssig.

Quellen für die Entstehung von zufälligen Fehlern sind beispielsweise die Übertragungsfrequenz (je kleiner die Frequenz bei einer bestimmten Pulslänge desto größer die zufälligen Fehler), das Signal-Rausch-Verhältnis (je niedriger das Verhältnis desto größer die zufälligen Fehler) und der Strahlwinkel (erreicht der Strahlwinkel die Vertikale, geht der zufällige Fehler gegen unendlich). Die Größe der zufälligen Fehler eines Pings liegt im Bereich von einigen mm/s bis zu 0.5 m/s. Hierbei spielen interne Faktoren (z. B. Frequenz, Größe der Tiefenzellen, Anzahl der gemittelten Pings, Strahlgeometrie) und externe Faktoren (z. B. Turbulenzen, interne Wellen, Bewegung des ADCP) eine Rolle. Eine Schätzung der zufälligen Fehler ist durch Berechnung der Standardabweichung der Fehlergeschwindigkeit möglich, da die zufälligen Fehler der Schallstrahlen unabhängig sind und die Fehlergeschwindigkeit vom ADCP skaliert wird, um den richtigen Betrag der zufälligen Fehler der Horizontalgeschwindigkeit zu erhalten.

Der Betrag und die Richtung des systematischen Fehlers ist entweder konstant oder proportional zur gemessenen Geschwindigkeit und gewöhnlich kleiner als 10 mm/s. Er hängt von Faktoren wie z. B. der Temperatur, der mittleren Strömungsgeschwindigkeit, dem Signal-Rauschverhältnis und der Strahlgeometrie ab. Bisher ist es nicht möglich, systematische Fehler zu messen und zu kalibrieren oder in der Nachbearbeitung zu beseitigen. Strahlrichtungsfehler (Unsicherheiten in der Strahlrichtung) des Schwingers können eine dominante Quelle für systematische Geschwindigkeitsfehler sein. Sie werden im Herstellungsprozess gemessen, im Datenspeicher des ADCP gespeichert und bei der Umrechnung von Strahl- in erdbezogene Geschwindigkeitskomponenten (Nord, Ost) angebracht.

Die Fehlergeschwindigkeit, die sich bei Messung eines Pings ergibt, erfüllt die Genauigkeitsanforderungen der meisten Anwendungen nicht. Um die Messunsicherheit zu reduzieren, werden die Daten über einen bestimmten Zeitraum zu sogenannten Ensembles gemittelt. Im Rahmen der durchgeführten

ADCP-Messung ist die kürzest mögliche Ensemblezeit von fünf Sekunden gewählt worden. Dies ergibt bei Fahrgeschwindigkeiten von 3 ... 6 kn etwa alle 10 ... 20 m ein Ensemble.

Um die für die Datenübertragung und Umrechnung benötigte Zeit zu reduzieren und den Ping-Prozess nicht abzubremsen, ist es sinnvoll, die Mittelung der ADCP-Messwerte im Gerät durchzuführen, sodass auch Strahlrichtungsfehler berücksichtigt und systematische Fehler minimiert werden.

Die Mittelung wird begrenzt durch die Pingrate, die wiederum begrenzt wird durch die Schnelligkeit der Datensammlung, Verarbeitung und Übertragung durch den ADCP.

Jeder Ping besteht aus folgenden fünf Phasen:

1. Zuschlag (Overhead): Aufwecken, Initialisierung des ADCP, Verarbeitung verschiedener Untersysteme (Uhr, Kompass), Vorbereitung des Pingprozesses
2. Aussendung des Impulses
3. Leerperiode oder Wartezeit
4. Empfang der Echos
5. Schlaf (Sleep): der ADCP ruht, wenn keine Datensammlung ansteht

Sind alle Pings beendet, werden die Ensemblesmittelwerte berechnet und zum externen Datensammlungssystem übertragen. Während des Pingvorgangs findet die Datenübermittlung im Hintergrund statt.

4.4 Berechnung der Strömungen

Die Strömungsmessung erfolgt relativ zum ADCP, wobei der ADCP selbst beliebig orientiert sein kann und sich relativ zur Erde bewegt. Die Daten müssen wegen Bewegung des ADCP korrigiert werden. Es gibt zwei Bewegungsarten, die eine Korrektur erfordern — Rotation (Stampfen, Rollen, Kurswinkeländerung) und Translation (Versatz aufgrund der Schiffsgeschwindigkeit).

ADCP's messen die Geschwindigkeit in Strahlkoordinaten, die in ein orthogonales ADCP-Koordinatensystem mit Rechtvoraus-, Steuerbordseite- und Vertikalkomponente umgerechnet werden. Bei dieser Umrechnung wechselt das Bezugssystem vom schwingerbezogenen in ein schiffsbezogenes System. Der verwendete Strahlwinkel (vgl. Formel 4.3) entspricht der Summe aus dem ADCP-Montagewinkel (hier 20°) plus (oder minus) dem jeweiligen Neigungswinkel. Ebenso findet Beachtung, dass die Tiefenzellen eines geneigten ADCP's sich relativ zueinander auf und nieder bewegen (Abbildung 4.10).

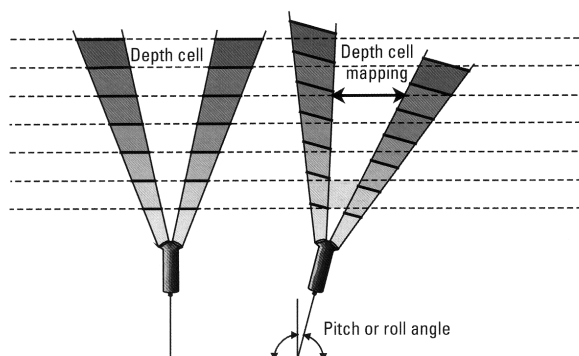


Abb. 4.10: Darstellung der Änderung der Tiefenzellen bei Auftreten eines Roll- oder Stampffehlers [Simpson 2001].

Anschließend werden mit Hilfe des Kurswinkels die Geschwindigkeitskomponenten in Ost- und Nordrichtung berechnet und so der Bezug zum geographischen Koordinatensystem hergestellt. Um die durch die Relativbewegung zur Erde beeinflussten Geschwindigkeiten in einem ruhenden absoluten Geschwindigkeitssystem erdreferenziert darstellen zu können, wird nach der Datensammlung und -aufzeichnung die ADCP-Geschwindigkeit (= Schiffsgeschwindigkeit) relativ zum Wasserkörper abgezogen.

4.4.1 Rotation und Translation

Es gibt mehrere Methoden zur Messung von Translation und Rotation:

- Rotation (Kurswinkel): Flux-Gate-Kompass oder Kreiselkompass (hier Kreiselkompass)
- Rotation (Rollen, Stampfen): Neigungsmesser oder künstlicher Horizont (hier Neigungsmesser TCM2)
- Translation: Bodenverfolgung oder Navigationsgerät (z. B. GPS) oder Bestimmung der Bewegung gegenüber einer als unbeweglichen angenommenen Referenzschicht (hier Bodenverfolgung)

Der ADCP benötigt während des Pingprozesses den Kurswinkel und empfängt diesen in der Regel über ein Synchronisationsinterface zum Kreiselkompass. Dies war während der Meßfahrt aufgrund eines defekten Synchronisationsinterfaces nicht möglich und die Kursinformationen mussten bei der Auswertung nachträglich eingespeist werden.

Die Roll- und Stampfbewegungen des Schiffes in Oberflächenwellen und die im Vergleich zu den gemessenen Strömungen große Schiffsgeschwindigkeit begrenzen die Datenqualität der schiffsgestützten ADCP-Messung. 1985 wurden von Kosro Messungen durchgeführt, die Aufschluß über die Notwendigkeit der Anbringung von Roll- und Stampfkorrekturen an die Ergebnisse von ADCP-Messungen geben sollten [Gordon 1996]. Es ergab sich ein systematischer Fehler von etwa 1 cm/s zwischen den korrigierten und unkorrigierten horizontalen Strömungen. Die unkorrigierten Daten sind außerdem über einen Tiefenbereich geglättet, welcher in etwa der Strecke entspricht, über die die Tiefenzellen wegen des Rollens und Stampfens auf oder nieder bewegt wurden. Die Differenz zwischen korrigierten und unkorrigierten Vertikalströmungen betrug circa 5 cm/s. Daraus wird gefolgert, dass Roll- und Stampfkorrektur nur bei höchster Datengenauigkeit, harten Wellenbedingungen oder dem Wunsch nach genauen Vertikalgeschwindigkeitskomponenten erforderlich ist.

4.4.2 Korrektur wegen Schiffsgeschwindigkeit

Die Schiffsgeschwindigkeit wird entlang eines Profils aufgezeichnet, um diese dann während der Verarbeitung von den Strömungsprofilaten abziehen zu können. Für ihre Bestimmung gibt es drei Möglichkeiten:

1. *Bodenverfolgung:*

Diese kann nur benutzt werden, wenn der Gewässerboden innerhalb des ADCP-Bodenverfolgungsbereiches liegt (ungefähr das Anderthalbfache des normalen Profilbereiches). Bei der Bodenverfolgung werden lange Impulse benutzt, um den Boden mit dem gesamten Strahl zur gleichen Zeit abzudecken (Abbildung 4.11). Bei kurzen Impulsen kommt das Echo zuerst von der Vorderseite des Impulses zurück, später gefolgt von dem des Impulsendes. Weil der Strahl eine bestimmte Strahlbreite hat, ist der Winkel des Strahles gegenüber der Horizontalen an den beiden Rändern

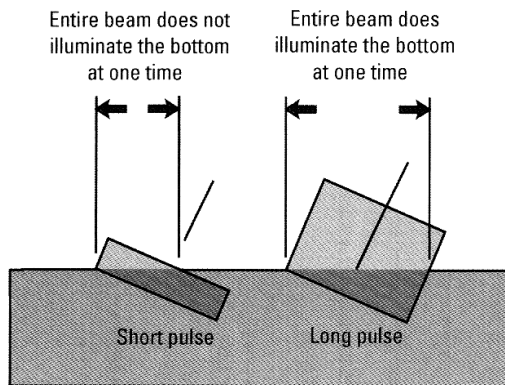


Abb. 4.11: Lange Impulse werden benötigt, um den Boden zur gleichen Zeit mit dem gesamten Schallstrahl zu beleuchten [Simpson 2001].

unterschiedlich. Die Dopplerverschiebung ist also von einer Seite des Strahles zur anderen unterschiedlich. Wird der Boden von einem Impuls jedoch komplett „beleuchtet“, ist eine genaue Schätzung der Geschwindigkeit möglich.

Ein Nachteil langer Aussendeimpulse ist, dass ein großer Teil des Echos aus der Wassermasse kommt. Dies wird in Gebieten zum Problem, wo hohe Konzentrationen von Schwebstoffen (z. B. in Flüssen) existieren. Dort können Wassermassenechos signifikante systematische Fehler hervorrufen.

Die Bodenverfolgung wird anhand einzelner Pings des Strömungsprofils durchgeführt, jedoch mit längerem Aussendeimpuls und anderer Echoverarbeitung. Das Bodenverfolgungsprofil wird in mindestens 128 Tiefenzellen geteilt, welche schmäler als der ausgesandte Impuls sind. Diese werden durchsucht, um anhand des zentralen Echoteiles die Dopplerverschiebung zu berechnen. Zur Berechnung der Tiefe wird die Hinterkante des Echos benutzt, da diese aufgrund der geneigten Schallstrahlen eine schärfere und genauere Schätzung der Bodentiefe liefert als die Vorderkante. Die Bodenverfolgungsgenauigkeit eines einzelnen Strahls liegt typischerweise bei einigen mm/s mit einer Tiefenauflösung von circa 0.1 m.

Liegen Bodenverfolgungsdaten vor, kann die Korrektur der Strömungsgeschwindigkeiten relativ leicht durchgeführt werden, da diese Daten genauer sind als die Strömungsprofildaten und beide Geschwindigkeiten im gleichen Koordinatensystem gemessen werden. Der größte Vorteil bei der Bodenverfolgung ist, dass Kompassfehler und systematische Geschwindigkeitsfehler, die durch Strahlrichtungsfehler verursacht werden mit den Fehlern im Strömungsprofil übereinstimmen und sich bei der Subtraktion der Werte gegenseitig aufheben.

2. Navigationsdaten:

Im Gegensatz zur Bodenverfolgung teilen Schiffsnavigation und Strömungsmessung keine Gleichaktfehler. So sind z.B. Fehler von 1° oder mehr gebräuchlich bei Schiffskreisellkompassen. Ein Kompassfehler von 1° verursacht einen seitlichen Geschwindigkeitsfehler von nahezu 10 cm/s, wenn das Schiff mit 5 m/s läuft. Die Ursachen für Kurswinkelfehler sind beispielsweise eine Senderfehlausrichtung oder Kreisellkompassfehler.

- **Senderfehlausrichtung:** Dieser Fehler resultiert aus der Schwierigkeit, die Orientierung des Senders im Schiff zu bestimmen. Eine Ausrichtung des ADCP's auf die Schiffsvoraussichtung ist nicht zwingend erforderlich, aber die Orientierung muss bekannt sein, um Fehler bei der Umrechnung der Strömungsrichtungen zu vermeiden.
- **Kreiselfehler:** Diese Fehler hängen von Fabrikat und Modell des Kreisellkompasses ab. Eine Fehlerquelle ist die Schuler Oszillation: ein Richtungsfehler mit einer Periode von 84 Minuten.

ten und einer Amplitude von typischerweise 0.5° bis 1.0° . Sie wird zumeist angeregt, wenn das Schiff eine Wende macht.

Die Genauigkeit der Navigationskorrektur hängt stark vom benutzten Navigationssystem ab. Hierbei ist DGPS zumeist die beste Wahl. Dennoch bringt die Bodenverfolgung meist kleinere zufällige Fehler als das beste GPS.

3. Annahme einer unbewegten Schicht als Referenzschicht:

Die Einsetzbarkeit dieser Annahme hängt vom Messgebiet ab.

4.5 Fehlerquellen der Schallmessung

Der Messbereich eines ADCP's wird durch verschiedene Gegebenheiten eingeschränkt.

4.5.1 Messung in der Nähe von Grenzflächen

Das Echo einer harten Oberfläche wie der Meeresoberfläche oder dem Boden ist wesentlich stärker als das Echo von Partikeln im Wasser, daher sollten Echos aus der Oberflächen- oder Bodennähe bei der Betrachtung der Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen keine Beachtung finden.

Für Schwinger mit einem Winkel von 20° zur Vertikalen kommt das Echo der Schallnebenkeule gleichzeitig mit dem Echo der Hauptkeule bei 94 % der Tiefe zurück. Dies bedeutet, dass die letzten 6 % der Messbereiche verfälscht sein können (4.4). Für die Messungen vor Sylt bei einer Tiefe von 30 m bedeutet dies, dass der vertrauenswürdige Messbereich etwa 1.80 m über dem Seeboden endet.

$$R_{max} = d_{ADCP} \cos \Theta_1, \quad (4.4)$$

wobei:

- R_{max} : maximaler Messbereich für akzeptable Daten
- d_{ADCP} : Entfernung des ADCP's zum Boden
- Θ_1 : Winkel des Strahls relativ zur Vertikalen.

4.5.2 Ringing

Der Ringingeffekt wird dadurch hervorgerufen, dass sich noch Energie des ausgesendeten Impulses im Wasser befindet, nachdem dieser beendet ist. Er bewirkt eine Verfälschung der relativ schwachen Echosignale. Dies ist der Grund für die Wartezeit (blanking period) des Schwingers vor Empfangen des Echos. Die Fehler, die durch Ringing auftreten, beeinflussen Geschwindigkeitsdaten in Richtung einer Nullgeschwindigkeit, da das Ringing-Signal nicht dopplerverschoben ist.

4.5.3 Luftblasen

Unter den Schwinger geratende Luftblasen können die Schallübertragung erheblich behindern oder sogar abblocken. Zur Luftblasenbildung kommt es beispielsweise, wenn in rauher See durch brechende Wellen Luft unter die Wasseroberfläche gelangt oder es durch Kavitation zur Bildung von Gasblasen unter dem Schiffskörper kommt.

4.5.4 Echointensität

Sie dient als Mass zur Beurteilung der Signalstärke, des vom ausgesendeten ADCP-Impuls zurückkommenden Echos und hängt von der Schallabsorption, der Schallstrahlstreuung, der übertragenen Leistung und dem Rückstreuungskoeffizienten ab. Der maximale Messbereich wird durch die Gebiete begrenzt, in denen die Signalstärke in Bereiche kommt, die mit dem Rauschpegel vergleichbar sind. Jenseits dieses Bereiches kann der ADCP die Dopplerverschiebung nicht mehr exakt berechnen und die Geschwindigkeitsbestimmung wird zu ungenau. Gründe für eine niedrige Intensität sind z. B. die Entfernung zwischen Tiefenzelle und Empfänger oder die spärliche Präsenz von reflektierenden Partikeln.

4.5.5 Schallabsorption

Physische und chemische Prozesse im Wasser reduzieren durch Absorption die Signalstärke der Echos. Die Absorption verursacht eine lineare Reduktion der Echointensität mit dem Messbereich und klingt mit ansteigendem Messbereich exponentiell ab. Die Schallabsorption (in dB/m) steigt in etwa frequenzproportional innerhalb der Frequenzbereiche, in denen ADCP's arbeiten (75 ... 1200 kHz). Es besteht eine inverse Beziehung zwischen Frequenz und Messbereich.

4.5.6 Strahlstreuung

Die geometrische Ursache für die Echodämpfung im Bezug auf den Messbereich ist die Streuung des Schallstrahls, die einen logarithmischen Verlust von Echointensität mit ansteigendem Messbereich zur Folge hat. Die Verdopplung der Entfernung zu einem reflektierenden Partikel verursacht eine Reduktion des Echos um ein Viertel. Da der Strahl jedoch einen viermal so großen Bereich abdeckt, reflektieren viermal mehr Partikel den Schall, sodass die gesamte reflektierte Energie konstant bleibt.

4.5.7 Reflektionsverursacher

Die Konzentration der reflektierenden Partikel (hauptsächlich Zooplankton mit einer Größe von einem Millimeter) beeinflusst den Messbereich, da mehr Partikel auch mehr Schall reflektieren. Besteht ein Mangel an reflektierendem Material im Wasser, wird der Messbereich relativ zum Nennbereich reduziert. Andere Ursachen für die Reflektion von Schall sind Schwebstoffe oder Dichtegradienten.

4.5.8 Sprungschichten

Im Messgebiet Lister Tief sind keine vertikalen Sprungschichten zu erwarten, da keine Zuflüsse aus Flüssen oder ähnlichem vorhanden sind. Die Vermutung der Existenz von horizontalen Sprungschichten wurde anhand von CTD Messungen des 10. August 2002 widerlegt (Abbildung 4.12).

Alle drei Vertikalprofile (Wassertemperatur, Salzgehalt und Dichte) zeigen ein schwach entwickeltes zweifach-geschichtetes System bei einer Wassertiefe von 1.50 m. Die Differenz der Wassertemperatur zwischen diesen beiden Schichten beträgt 0.1° Celsius. Der Salzgehalt bleibt mehr oder weniger konstant bei 28.5 PSU und die potentielle Dichte weist einen Unterschied von -0.1 kg m^{-3} auf. Die Wassersäule ist zu dieser Zeit in diesem Küstengebiet gut durchmischt gewesen, und die schwache Schichtung kann vernachlässigt werden.

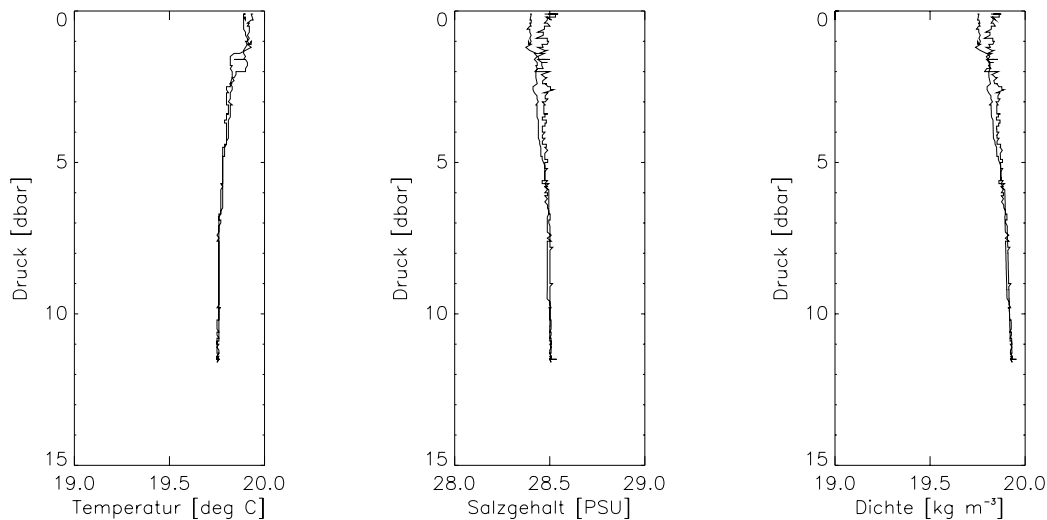


Abb. 4.12: Ergebnis der CTD-Messung vom 10.08.2002, von links nach rechts: Wassertemperatur, Salzgehalt, Dichte.

4.5.9 Schallgeschwindigkeit

Die Berechnung der Schallgeschwindigkeit findet unter Beachtung des im ADCP eingestellten Salzgehalts, der Eintauchtiefe des Schwingers und der vom ADCP gemessenen Temperatur statt. Sie wird zusammen mit den anderen ADCP-Daten abgespeichert.

Die Ausgabe der Geschwindigkeitsdaten erfolgt in cm/s. Der Skalierungsfaktor für die Geschwindigkeit ist proportional zu der Schallgeschwindigkeit, die am Sender gemessen wird. Wurde z. B. der Salzgehalt falsch voreingestellt, kann die Strömungsgeschwindigkeit in der Nachbearbeitung mit der Schallgeschwindigkeit nach

$$V_{\text{verbessert}} = V_{\text{unverbessert}} (c_{\text{real}} / c_{\text{ADCP}}), \quad (4.5)$$

mit:

- c_{real} : wahre Schallgeschwindigkeit
- c_{ADCP} : Schallgeschwindigkeit, welche anhand von voreingestelltem Salzgehalt und gemessener Temperatur durch den ADCP berechnet wird,

verbessert werden.

Die Berechnung von c_{ADCP} erfolgt nach derselben Formel wie die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit für das Echolot (3.18).

Der ADCP berechnet die Strömungen der Tiefenzellen unter der Annahme, dass die Schallgeschwindigkeit über die gesamte Wassersäule homogen ist. Sollte bekannt sein, dass bei einem großen Messbereich die Schallgeschwindigkeit in den tieferen Schichten zu der am Schwinger gemessenen Geschwindigkeit variiert, kann bei bekanntem Schallprofil die Tiefe jeder Tiefenzelle korrigiert werden. Ein solches Schallprofil könnte z. B. anhand eines Eichwandlers bestimmt werden.

4.6 Daten

Die Aufzeichnung von Strömungsdaten mit dem schiffsgestützten ADCP von RDInstruments erzeugt pro gefahrenem Profil je ein Paar von Dateien. Die Strömungsdatenspeicherung erfolgt hierbei in binären Dateien, die der Navigationsdaten in ASCII-Dateien. Durch die Auswertung der Rohdaten mittels des Programmmoduls `PLAYBACK` des Programms `TRANSECT` von RDInstruments werden aus den binären Strömungsdateien ASCII-Dateien erzeugt, die zur Auswertung benutzt werden können.

Für die Umwandlung wird eine `*.cfg`-Datei (Konfigurationsdatei) benötigt, die unter anderem Einstellungsgrößen zur Kalibrierung, wie z.B. die Schwingertiefe, Einstellung von Offsets oder konstanten Größen (z.B. Salzgehalt) enthält. Die Inhalte der für diese Arbeit verwendeten Konfigurationsdatei `kor0.cfg` finden sich im Anhang B.3. Um die Messergebnisse auswerten zu können, müssen die Daten der Navigations- und Strömungsdateien zusammengeführt werden.

4.6.1 Navigationsdaten

Die Navigationsdateien enthalten ASCII-Daten, die während der Datenerhebung der Strömungsdaten von einem externen Navigationsgerät (NavBeacon) gesammelt wurden. Die Dateibezeichnung lautet `kor***n.000`. Da die GPS-Daten im System des WGS84 bereitgestellt werden, müssen sie zur Weiterverarbeitung oder Darstellung auf das jeweilige Gebrauchssystem umgerechnet werden. Bei den vorliegenden Messungen erfolgt diese Transformation bei der Auswertung anhand einer 7-Parametertransformation. Hierauf wird in Abschnitt 5.1.3 eingegangen.

Die Aufzeichnung der Positionsdaten beginnt jeweils mit dem Starten eines neuen Messprofils. Die Navigationsdaten werden fortlaufend von einem externen Navigationsgerät (in diesem Fall GPS-Empfänger) übernommen und in die Datei geschrieben. Ist ein Messensemble des ADCP beendet (Zeitdauer pro Ensemble mit Aufzeichnung und Speicherung etwa 7 Sekunden), wird in die Navigationsdatei ebenfalls die zugehörige Ensemblenummer sowie die Rechnerzeit geschrieben. Sobald das Messprofil beendet ist, wird die Datei geschlossen und abgespeichert. Dies bedeutet, dass ein Navigationsdatenblock immer der nachfolgenden Ensemblenummer zugeordnet werden muss, um eine richtige Darstellung der Ensemblepositionen zu erhalten. Ein Beispielauszug aus einer `kor***n.000` Datei ist in der Abbildung 4.13 dargestellt.

```
$GPVTG,287.8,T,,005.83,N,010.79,K,D*41
$GPGGA,050237,5503.3886724,N,00827.9684933,E,2,07,1.1,7.69,M,44.60,M,6.2,0705*63
$GPVTG,287.3,T,,005.78,N,010.70,K,D*47
$GPGGA,050238,5503.3891405,N,00827.9657224,E,2,07,1.1,7.62,M,44.60,M,4.8,0705*6A
$GPVTG,288.4,T,,005.90,N,010.93,K,D*44
$GPGGA,050239,5503.3896374,N,00827.9630260,E,2,07,1.1,7.61,M,44.60,M,5.8,0705*6E
$GPVTG,287.7,T,,005.87,N,010.87,K,D*4B

ENSEMBLE      4 PCTIME 2535712
$GPGGA,050240,5503.3901754,N,00827.9603185,E,2,07,1.1,7.64,M,44.60,M,5.0,0705*6C
$GPVTG,287.4,T,,005.89,N,010.92,K,D*42
$GPGGA,050241,5503.3906395,N,00827.9575966,E,2,07,1.1,7.65,M,44.60,M,6.0,0705*66
$GPVTG,286.8,T,,005.83,N,010.80,K,D*46
$GPGGA,050242,5503.3910657,N,00827.9549025,E,2,07,1.1,7.60,M,44.60,M,5.2,0705*6C
$GPVTG,286.2,T,,005.89,N,010.92,K,D*45
```

Abb. 4.13: Auszug aus einer `kor***n.000`-Datei.

Die ursprüngliche Annahme, dass die Ensemblenummer den nachfolgenden Positionen zuzuordnen ist (wie durch die Verwendung einer Leerzeile zwischen Daten und folgender Ensemblenummer sugge-

riert wird) hat sich im Rahmen dieser Arbeit durch den Vergleich von ADCP-Tiefen und Echolottiefen als falsch erwiesen. Es wurde eine deutliche Verschiebung der beiden Tiefenprofile gegeneinander festgestellt, die sich durch die umgekehrte Zuordnung beheben läßt.

Die GPS-Datensätze der Datei bestehen aus Strings im Datenformat GGA und VTG, welche in dem vom NavBeacon unterstützten NMEA-0813-Datensatz zur Verfügung stehen. Aus dem GGA-String können Informationen zur Zeit und der Position entnommen werden, während der VTG-String Informationen zum aktuellen Kurs und der Fahrt über Grund liefert.

4.6.2 Strömungsdaten

Die Strömungsdaten, die üblicherweise bei ADCP-Messungen aufgezeichnet werden, sind die Geschwindigkeitskomponenten, die Echointensität, die Korrelation und „percent good“, eine Variable, die zur Beurteilung der akustischen Gegebenheiten benutzt wird. Messungen mit niedrigem „percent good“, garantieren nicht, dass genug Energie im Echo vorhanden ist, um den Dopplerversatz aufzulösen.

Die im ASCII-Textformat entstehende Strömungsdatei kor***t.000 gliedert sich in mehrere Ensembles, die jeweils ein Vertikalprofil darstellen und die Messwerte der Tiefenzellen (Ergebnis der geräteinternen Mittelung über fünf Sekunden) vom ADCP-Schwinger bis zum Gewässerboden enthalten. Die Abspeicherung der Ensembles erfolgt jeweils mit einem Kopfzeilenblock, der Informationen zur Messung enthält und sich aus neun Zeilen zusammen setzt (vgl. Abbildung 4.14).

```

          Sylt  KOR
          ( Ludwig Prandtl  CFG:Sylt )
          25      25      170      100      4      5      4
2  8 10 5 2 11 92  4  0  0.550  -0.180  90.000  19.340
280.30  -91.20  1.60  2.00  -32768  -32768  -32768  -32768  22.90  23.06  22.90  23.56
0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
30000.0000000 30000.0000000  -32768  -32768  0.0
0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  -0.0  0.0  -0.0  2.3  21.3
100 cm BT dB 0.43  0.370

```

Abb. 4.14: Kopfzeilenblock der ADCP-Datei kor***t.000.

Die ersten drei Zeilen sind nur beim jeweils ersten Ensemble einer Profildatei enthalten, da die Informationen für das ganze Messprofil gelten. Es besteht dort die Möglichkeit, Bezeichnungen und weitere Informationen hinzuzufügen, die im Dateiheder gespeichert werden. Zusätzlich werden die Voreinstellungen aufgezeigt, die bei der Messung benutzt wurden, um eventuell falsche Einstellungen später durch Umrechnung rückgängig machen zu können. Die genaue Aufschlüsselung des Kopfzeilenblockinhaltes ist dem Anhang A zu entnehmen.

Die Darstellung der Strömungsdaten findet spaltenorientiert in Tabellenform statt (Abbildung 4.15). Die Nummerierung der Spalten z.B. (1) ist in den originären Dateien nicht enthalten und wurde nachträglich hinzugefügt, um die Zuordnung zu vereinfachen. Die Bedeutung der einzelnen Spalten ist der Tabelle 4.1 zu entnehmen. Bei dem Strömungsbetrag handelt es sich um den horizontalen Betrag, welcher in direktem Zusammenhang mit der Nord- und Ostkomponente steht.

Die Dummywerte, die bei schlechter Datenqualität oder fehlenden Meßwerten eingesetzt werden, sind bei den Geschwindigkeitswerten -32768, beim Durchfluss 2147483647 und für Länge oder Breite 3000.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
2.32	118.26	146.485	65.3	-98.6	-2.4	-5.8	68.7	68.7	67.8	71.7	100	0.00
2.57	92.86	146.241	51.6	-77.2	5.1	2.9	74.6	73.8	72.9	75.9	100	0.00
2.82	102.46	145.457	58.1	-84.4	5.7	-10.2	76.3	74.1	72.0	76.7	100	0.00
3.07	112.99	145.128	64.6	-92.7	2.3	5.9	76.6	74.9	72.7	77.9	100	0.00
3.32	114.48	147.920	60.8	-97.0	0.3	-9.7	77.5	75.7	74.0	78.7	100	0.00
3.57	96.61	136.258	66.8	-69.8	-2.7	-2.2	78.1	76.4	74.6	78.9	100	0.00
3.82	103.50	136.762	70.9	-75.4	-2.0	4.3	78.5	76.8	74.2	79.8	100	0.00
4.07	115.88	137.693	78.0	-85.7	0.7	-3.1	79.3	76.3	74.1	79.7	100	0.00
4.32	124.00	142.141	76.1	-97.9	-2.2	-0.1	78.7	77.0	74.4	80.0	100	0.00
4.57	109.53	137.923	73.4	-81.3	-3.0	-8.1	79.7	78.0	75.4	80.1	100	0.00
4.82	111.18	145.295	63.3	-91.4	-0.3	-17.1	79.8	78.0	75.5	79.8	100	0.00
5.07	115.80	133.425	84.1	-79.6	-1.5	-1.9	78.9	77.2	75.9	79.8	100	0.00
5.32	104.83	136.546	72.1	-76.1	-4.1	10.2	80.2	77.6	75.9	79.3	100	0.00
5.57	122.81	130.343	93.6	-79.5	-4.7	-8.4	79.2	77.9	76.2	79.7	100	0.00
5.82	114.71	132.032	85.2	-76.8	-0.7	15.9	78.7	78.7	76.5	80.4	100	0.00
6.07	105.76	136.801	72.4	-77.1	-1.4	-3.9	79.0	77.7	76.0	80.3	100	0.00
6.32	108.33	135.150	76.4	-76.8	1.6	-7.5	78.4	77.9	76.7	80.1	100	0.00
6.57	106.63	139.183	69.7	-80.7	1.4	7.0	78.6	77.7	76.0	81.6	100	0.00
6.82	107.55	129.908	82.5	-69.0	-0.8	3.5	79.2	78.0	76.2	81.8	100	0.00
7.07	108.09	126.043	87.4	-63.6	0.3	12.0	78.6	77.7	76.8	79.9	100	0.00
7.32	120.25	136.550	82.7	-87.3	-1.0	5.6	79.2	78.3	76.2	79.6	100	0.00
7.57	109.70	136.219	75.9	-79.2	0.4	0.4	79.7	77.6	75.9	79.3	100	0.00
7.82	103.13	133.586	74.7	-71.1	-3.1	-7.2	79.4	77.7	76.4	79.9	100	0.00
8.07	116.76	128.637	91.2	-72.9	1.6	3.6	79.6	77.8	76.6	79.6	100	0.00
8.32	116.01	136.537	79.8	-84.2	-0.3	-2.0	78.8	77.9	76.7	80.1	100	0.00
8.57	98.48	126.951	78.7	-59.2	-2.1	5.8	78.9	78.0	76.3	79.3	100	0.00
8.82	117.44	130.649	89.1	-76.5	0.3	3.8	78.6	78.1	76.4	79.0	100	0.00
9.07	105.96	130.062	81.1	-68.2	-1.1	-3.2	79.0	78.2	76.0	79.0	100	0.00
9.32	112.11	120.499	96.6	-56.9	-1.2	-5.0	78.7	78.2	75.7	79.5	100	0.00

Abb. 4.15: Beispiel aus einer kor***t.000-Strömungsdatendatei in der Form, in der sie auf den Kopfzeilenblock folgt; die Nummerierung der Spalten wurde nachträglich hinzugefügt.

Tab. 4.1: Aufschlüsselung des Spalteninhalts der ADCP-Strömungsdateien kor***t.000 (vgl. Abbildung 4.15).

Spalte	Spalteninhalt	Einheit
1	Anfangstiefe einer Tiefenzelle	[m]
2	Strömungsbetrag	[cm/s]
3	Richtung der Strömung	[°]
4	Ostkomponente	[cm/s]
5	Nordkomponente	[cm/s]
6	Vertikalkomponente	[cm/s]
7	Fehlergeschwindigkeit	[cm/s]
8	Echointensität Strahl 1	[dB]
9	Echointensität Strahl 2	[dB]
10	Echointensität Strahl 3	[dB]
11	Echointensität Strahl 4	[dB]
12	Qualitätswert (percent good)	[%]
13	Durchfluss	

4.6.3 Koordinatensysteme

Für die Aufzeichnung der Strömungsdaten stehen bei einem RDI ADCP unterschiedliche Koordinatensysteme zur Verfügung:

1. *Strahlkoordinaten* = Geschwindigkeit wird radial zu jedem Strahl gemessen
2. *ADCP-Koordinaten* = Geschwindigkeit wird in Rechtvoraus-, Seitwärts- und Vertikalkomponente bestimmt
3. *Schiffskoordinaten* = ähnlich ADCP Koordinaten, aber mit dem Kurswinkel nach Schiffsvorausrichtung
4. *Erdkoordinaten* = Geschwindigkeit in Nord-, Ost- und Vertikalkomponente umgerechnet

Die Kurswinkel, mit dem der ADCP die Strömungswerte in Nord- und Ostkomponente berechnet, werden im Normalfall von einem externen Kreisel übernommen und können bei der Auswertung aus den Kopfzeilenblöcken der einzelnen Ensembles in den Dateien `kor***t.000` entnommen werden. Wird ohne die Einspeisung externer Werte gearbeitet, nimmt der ADCP als Kurswinkel einen für alle Ensembles konstanten Wert an.

Dies war bei der Aufzeichnung der Daten dieser Kampagne der Fall, da eine defekte Schnittstelle eine direkte Übernahme der Kreiselwerte über ein Synchronisationsinterface verhindert hat. Aus der Kopfzeile der Ensembles ist zu entnehmen, dass die Konstante, die zur Berechnung der Komponenten verwendet wurde, 90° beträgt. Die berechneten Strömungen sind somit um $+90^\circ$ verdreht und müssen vor der Weiterverarbeitung um 90° reduziert werden.

Ist kein Kurswinkel vorhanden, beziehen sich die erfassten Strömungsdaten nicht auf geographisch Nord, sondern auf den jeweils aktuellen Kurs des Schiffes, d.h. Schiffsvoraus wird als die Nordrichtung betrachtet und die Strömungen somit in Bezug zu dieser Richtung berechnet. Um die Strömungen in einem einheitlichen Koordinatensystem, z.B. dem Nord-Ost-System, zu erhalten, müssen die jeweiligen Schiffskurse zu den auf das Schiff bezogenen Strömungsrichtungen addiert werden (vgl. Abbildung 4.16).

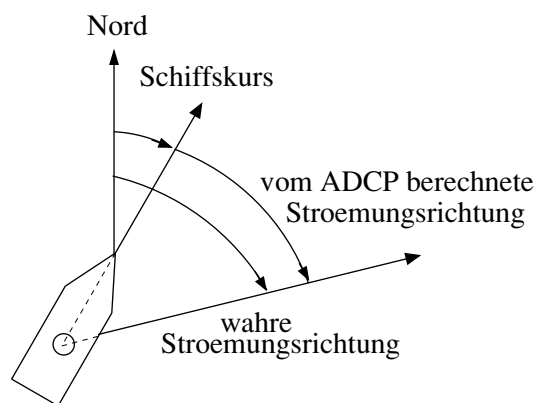


Abb. 4.16: Liegen dem ADCP keine Headingdaten vor, muss die wahre Strömungsrichtung nachträglich als Summe aus der ADCP-Strömungsrichtung (im Bezug auf Schiffsvoraus bestimmt) und dem Schiffskurs berechnet werden.

Die Aufzeichnung und Speicherung der Kursrichtungen des Kreiselkompasses erfolgte zu diesem Zweck mit dem Programm DigiNav. Um eine spätere Zuordnung zu den ADCP-Werten sicherzustellen, wurde der jeweilige Kreiselwert inklusive eines Zeitstempels in Tagessekunden in die Profildateien `profil***.raw` abgespeichert.

4.6.4 Festlegung der Strömungskomponenten

In den folgenden Abschnitten dieser Arbeit wird von verschiedenen Strömungskomponenten die Rede sein, deren Festlegung in der Abbildung 4.17 dargestellt ist.

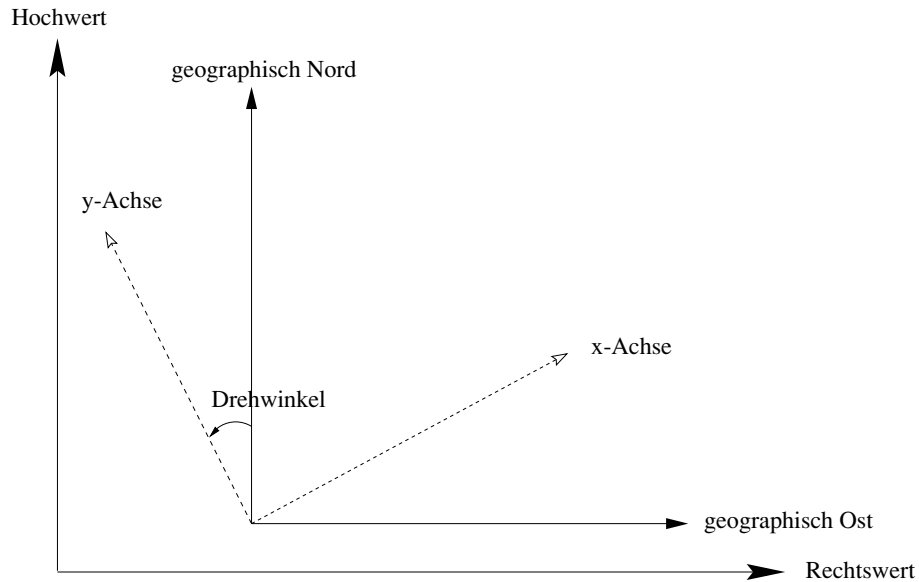


Abb. 4.17: Koordinatensystem zur Erläuterung der Lage der unterschiedlichen Strömungskomponenten zueinander; das x - y -System wird in 10° Schritten gegen den Uhrzeigersinn gedreht, um die Komponenten parallel und senkrecht zu den Sandwellenkämmen darzustellen.

Üblicherweise werden die von ADCP's gemessenen Strömungen in den Komponenten Ost- und Nord dargestellt. Im Rahmen dieser Arbeit interessiert die Überströmung der Sandwellen, deswegen werden durch Drehung des Koordinatensystems um den Ursprung ($10 \dots 100^\circ$ gegen den Uhrzeigersinn) die Strömungskomponenten senkrecht und parallel zum Verlauf der Sandwellenkämme berechnet und dargestellt. Die Bezeichnung der Achsen orientiert sich am mathematischen System und lautet für die Abszissenachse x -Achse und für die Ordinatenachse y -Achse.

5 SOFTWARE

Zur Entwicklung der Auswertungssoftware wurde das Programmpaket *PV-waveTM* des Herstellers Visual NumericsTM benutzt [Vis]. *PV-waveTM* kann zur visuellen Datenanalyse, Bild- und Signalverarbeitung sowie Animation eingesetzt werden und verfügt über eine umfangreiche Bibliothek zur Bearbeitung mathematischer, statistischer und wissenschaftlicher Problemstellungen. Es bedient sich einer eigenen prozeduralen 4GL Sprache, deren Sprachelemente sich zu Funktionen, Prozeduren und Programmen zusammenfassen lassen.

Im Rahmen dieser Arbeit sind nacheinander drei Programmmodule entstanden, die nach ihren Makefiles *ADCP*, *DARSTELLUNG* und *VERGLEICH* benannt sind und aufeinander aufbauen (Abbildung 5.1).

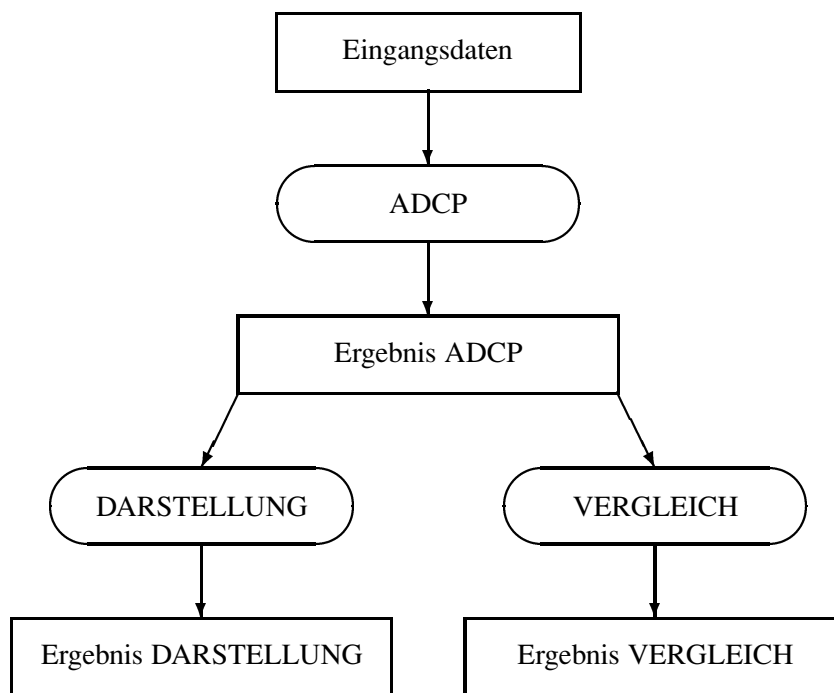


Abb. 5.1: Ablaufschema der drei Programmmodule *ADCP*, *DARSTELLUNG* und *VERGLEICH*.

Zu den drei Modulen sind zwei Optionsdateien entstanden – *options_ADCP.inc* und *options_Echolot.inc*, in welchen Pfadangaben und Dateinamen der Rohdaten als auch der neuentstehenden Dateien festgelegt werden. Außerdem können zum Beispiel Titel und Untertitel für die Achsen der entstehenden Grafiken angegeben oder die Erstellung verschiedener Grafiken aktiviert bzw. deaktiviert werden. Der Sinn dieser Optionsdateien liegt darin, verschiedene Datensätze prozessieren zu können, ohne die Variablen im Quellcode des Programmes ändern zu müssen. Alle entstandenen Programme bedie-

nen sich jeweils einer dieser beiden Optionsdateien. Welche Optionsdatei welchem Programm zugrunde liegt, ist in den jeweiligen Ablaufdiagrammen aufgeführt.

Bei der Programmentwicklung kam es zunächst darauf an, möglichst zügig die Datenauswertung soweit voranzutreiben, dass es möglich war, die Plausibilität der Daten zu prüfen und eventuell notwendige Neumessungen schnellstmöglich veranlassen zu können. Aus diesem Grund sind zunächst Programmteile des Moduls ADCP entstanden, die sich mit dem Auslesen der Navigationsdaten und deren Transformation in GK-Koordinaten befassen.

Zusätzlich kam es darauf an, die Strömungsdaten aufgrund der fehlenden Kurswinkel zu korrigieren und diese nach Kombination mit den Navigationsdaten als Darstellung der mittleren Strömungswerte eines Vertikalprofils abzubilden. Die Vernetzung der Programme des Moduls ADCP wird in den Abbildungen 5.2 und 5.3 aufgezeigt und ihre Funktion ab dem Abschnitt 5.1.1 beschrieben.

Die Darstellung der Ergebnisse in Isolinienplots sowohl der jeweiligen Messkomponente als auch der zugehörigen Gradienten übernimmt das Modul DARSTELLUNG. Die beiden Programme `darst.pro` und `gradient.pro` des Moduls werden in den Abschnitten 5.2.5 und 5.2.6, in denen auch ihre Ablaufdiagramme abgebildet sind, näher erläutert.

Abschließend ist ein Modul entstanden, das die Echolotungen und die Trackplots der gefahrenen Profile einander gegenüber stellt. Das Modul VERGLEICH besteht aus den beiden Programmen `Echolotung_Main.pro` und `Track_Main.pro`, deren Ablauf und Aufbau in den Abschnitten 5.3.2 und 5.3.3 ausführlicher behandelt wird.

Alle entstehenden Ergebnisdateien werden spaltenorientiert mit Leerzeichentrennung abgespeichert. Die Abspeicherung der Grafiken erfolgt im Format eines Postscript-Files.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Programme der Module näher vorgestellt.

options_ADCP.inc

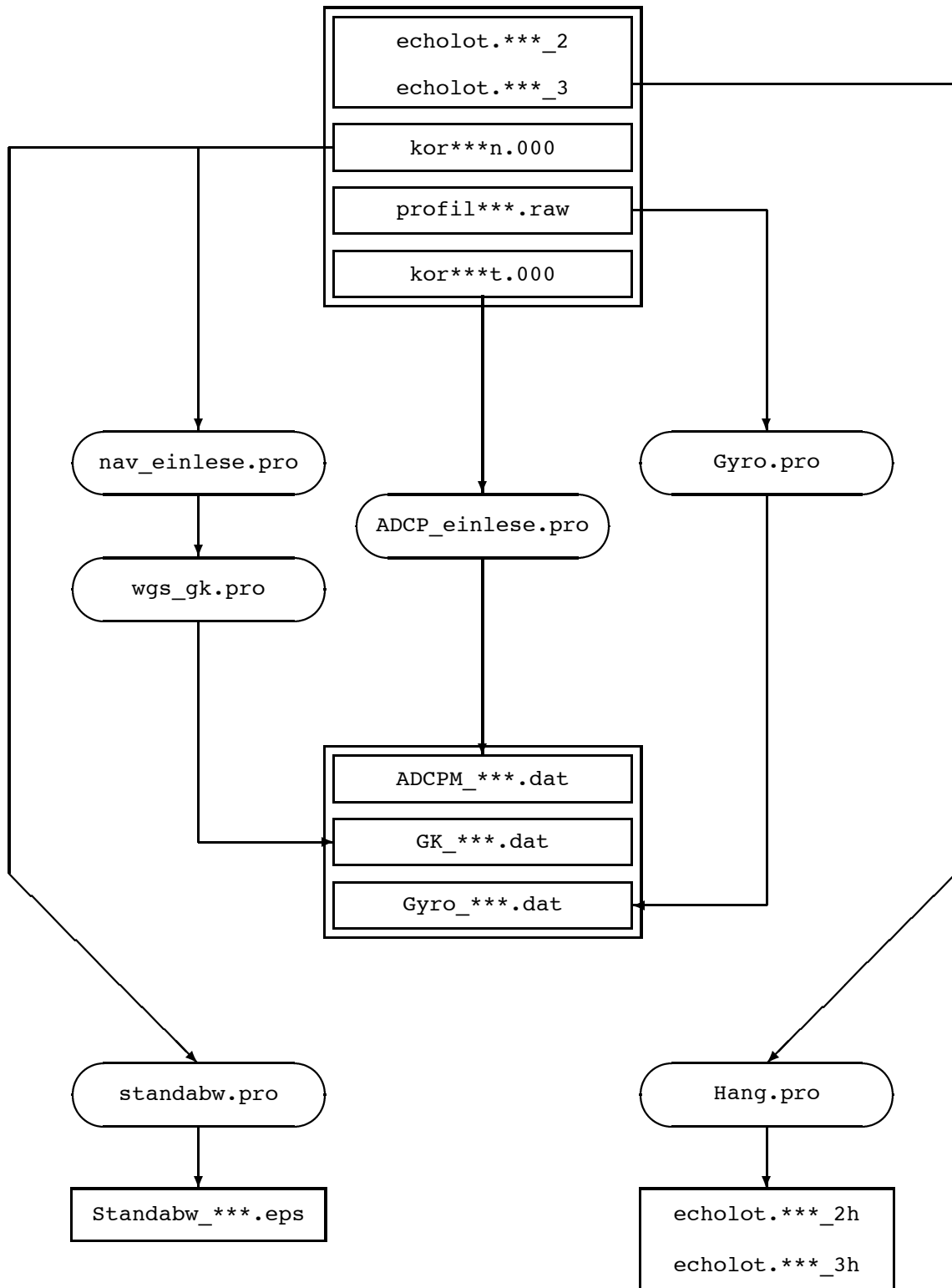


Abb. 5.2: Programmablauf im ersten Teil des Modules ADCP.

options_ADCP.inc

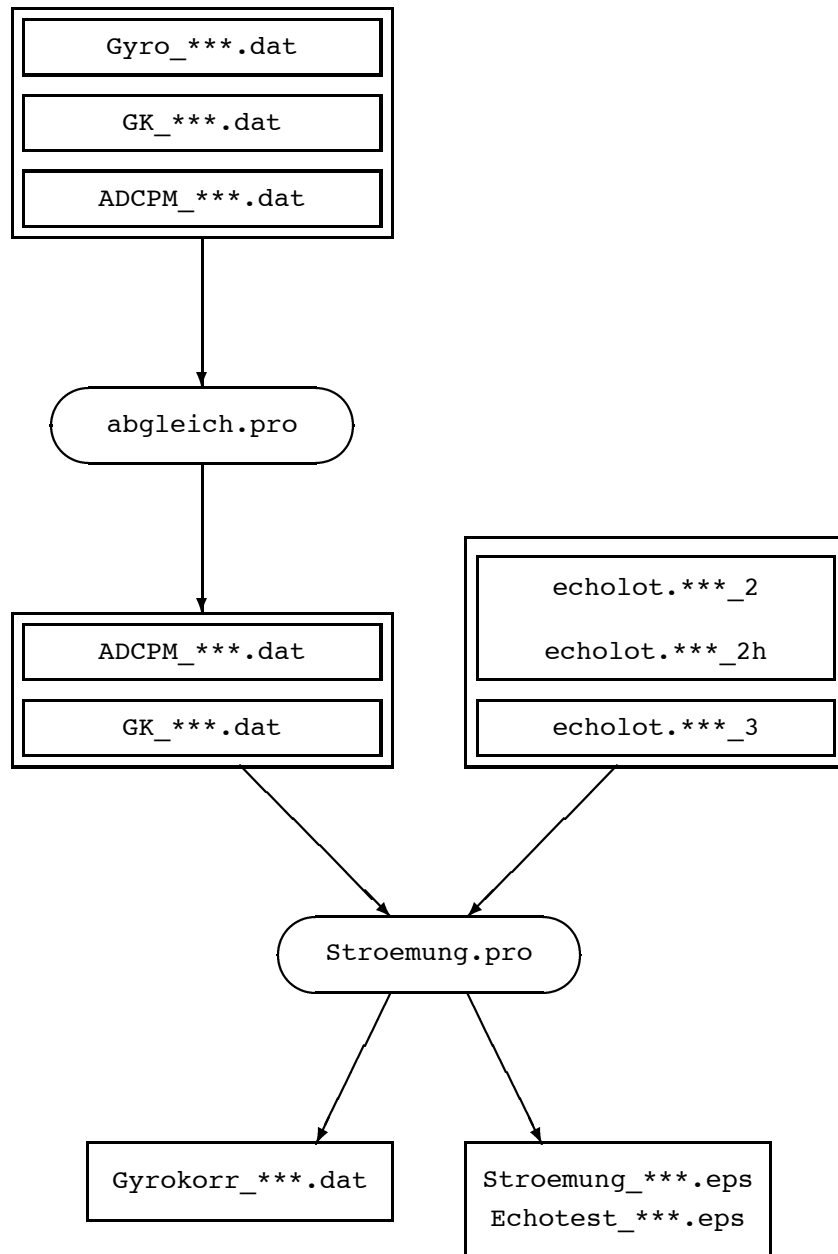


Abb. 5.3: Programmablauf des zweiten Teiles im Modul ADCP.

5.1 Verarbeitung der Navigationsdaten

5.1.1 nav_einlese.pro

Der Programmteil `nav_einlese.pro` bearbeitet die zur Strömungsmessung gehörenden Navigationsdateien `kor***n.000`. In diesen sind für jedes Ensemble etwa sieben bis acht WGS84-Positionen enthalten, die während eines Ensembles erreicht wurden. Diese werden arithmetisch gemittelt, um pro Ensemble ein Koordinatenpaar zu erhalten.

Die mit dem GPS aufgezeichneten Positionsdaten liegen im Format Grad und Dezimalminute vor und werden daher zunächst in reine Dezimalwerte umgerechnet. Die Berechnung des arithmetischen Mittels erfolgt schließlich mit der PV-Wave Funktion AVG [Gordon 1996]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad (5.1)$$

wobei:

\bar{x} : arithmetisches Mittel
 n : Anzahl der Werte
 x_i : Werte.

Die gemittelten Positionen werden anschließend im Format Grad, Minute, Sekunde zusammen mit der zugehörigen Ensemblenummer spaltenweise in die ASCII-Datei `wgs_***.dat` ausgegeben. Die Formatierung dieser Datei ist der Tabelle 5.1 zu entnehmen.

Die Formatierungsangaben teilen sich in I, X und F. Hierbei steht I für einfach genaue ganzzahlige Zahlen, X für freigehaltene Stellen, F für einfach genaue reelle Zahlen und D für doppelt genaue reelle Zahlen. Bei den Zahlenangaben hinter den Buchstaben handelt es sich um die Anzahl der Stellen, wobei sich die Zahlenangaben bei Float in Gesamtstellenanzahl und Nachkommastellen aufteilt, getrennt durch einen Punkt.

Tab. 5.1: Zusammenstellung Datenformat von `wgs_***.dat`.

		Länge						Breite				
Ensemblenr.	f	Grad	f	Minute	f	Sek.	f	Grad	f	Minute	f	Sek.
I5	6X	I2	3X	I2	3X	D9.6	3X	I2	3X	I2	3X	D9.6

5.1.2 standabw.pro

Der Programmteil `standabw.pro` berechnet die Standardabweichung der GK-Koordinaten, die in `nav_einlese.pro` zu einer Position gemittelt wurden. Die Aufdeckung grober GPS-Positionsfehler, welche eventuell durch Ausfall des differentiellen Signals auftreten können, soll so ermöglicht werden. Diese müssen beseitigt werden, da sie sonst die durch Mittelbildung berechnete Position des Ensembles verfälschen können.

Mit dem arithmetischen Mittel \bar{x} (5.1) erfolgt die Berechnung der Standardabweichung [Gordon 1996]

$$STD = \sqrt{\frac{\sum (l_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (5.2)$$

wobei:

- l_i : Messwert
- \bar{x} : arithmetisches Mittel von l_i
- n : Anzahl der Messwerte.

Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in den Grafiken `Standabw_***.eps` enthalten, welche die Standardabweichungen der Rechts- und Hochwerte in Metern darstellen. Zusätzlich wird in der oberen Kurve die Anzahl der Positionen, aus denen die Standardabweichung berechnet wurde, abgebildet. Das arithmetische Mittel der Standardabweichung wird unterhalb der Beschriftung der Abszissenachse aufgeführt (vgl. Abbildung 5.4).

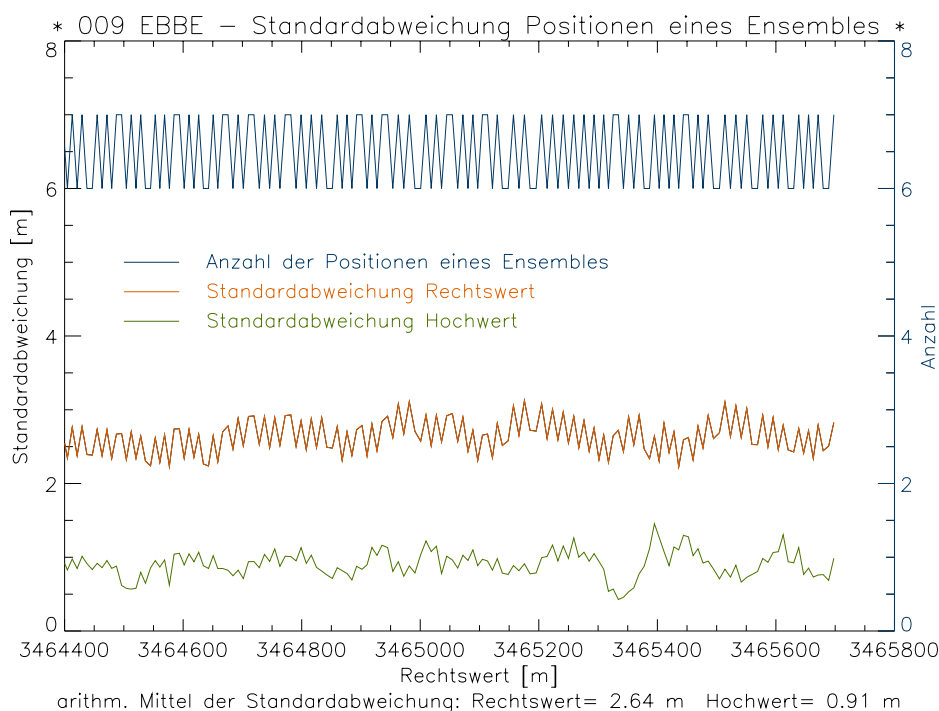


Abb. 5.4: Darstellung der Standardabweichungen der Positionen, die während eines Ensembles passiert wurden (`Standabw_***.eps`).

Treten keine signifikanten Unterschiede in der Standardabweichung auf, gibt es keine groben GPS-Ausreißer. Die Schwankung der Standardabweichung, welche die abgebildete Zackenform verursacht, ist auf die unterschiedlichen Strecken zurückzuführen, welche während eines Ensembles zurückgelegt wurden. Je mehr Strecke zurückgelegt wurde, um so größer ist die Standardabweichung, da die Entfernung der ersten und letzten Position eines Ensembles vom Mittelwert größer wird. Die Standardabweichung der Rechtswerte ist größer als die der Hochwerte, da die Profile annähernd in Ost-West-Richtung liegen und daher auch in dieser Richtung die größten Strecken zurückgelegt werden.

Die Standardabweichungen werden in der Datei `Standabw_***.dat` als Zahlenwerte abgelegt. In dieser Datei befinden sich auch die für jedes Ensemble gemittelten Werte für den GPS-Modus (Unterscheidung in Modus 1 und 2, wobei 1 für den normalen GPS-Modus steht, 2 für den DGPS-Modus), den PDOP und das Datenalter. Anhand dieser Werte können Ursachen für eventuell mangelhafte Positionen ergründet werden. Das verwendete Datenformat ist der Tabelle 5.2 zu entnehmen.

Tab. 5.2: Zusammenstellung Datenformat von Standabw_***.dat.

		Standardabweichung				Standardabweichung						Mittelwert				
EnsNr.	f	Rechts	f	Hoch	f	Modus	f	PDOP	f	ZeitV	f	Modus	f	PDOP	f	ZeitV
I5	2X	F5.2	2X	F5.2	4X	I2	2X	F3.1	2X	F3.1	4X	I2	2X	F3.1	2X	F4.1

5.1.3 wgs_gk.pro

Durch die Koordinatenbestimmung mittels GPS liegen Koordinaten im globalen geozentrischen WGS84-Koordinatensystem vor. Um diese als Koordinaten in einem bestimmten Zielkoordinatensystem zu erhalten, muß eine Transformation durchgeführt werden. Die der Transformation zugrunde liegenden Transformationsparameter sind der Tabelle 5.3 zu entnehmen.

Tab. 5.3: Parameter zur Datumstransformation (7-Parametertransformation) zwischen WGS84 und DHDN [Denker 1989].

Translation	dx	dy	dz
	-583.0 m	-68.2 m	-399.1 m
Rotation	ex	ey	ez
	0	0	-2.55''
Maßstabsfaktor	dm		
	$-10.52 \cdot 10^{-6}$		

Die vom GPS ausgegebenen ellipsoidischen Koordinaten φ , λ und h werden unter zu Hilfenahme der Ellipsoidparameter (siehe Tabelle 5.4) in globale geozentrische kartesische XYZ-Koordinaten im Datum des WGS84 umgerechnet.

Tab. 5.4: Ellipsoidparameter.

	große Halbachse a [m]	kleine Halbachse b [m]	Abplattung 1/f
Bessel Ellipsoid	6377397.155	6356078.963	299.1528120 *
WGS84 Ellipsoid	6378137	6356752.31425 *	298.257223563

* *abgeleiteter Parameter*

Anschließend erfolgt die Datumstransformation vom Datum des WGS84 in das Datum des DHDN (Potsdamdatum) mit einer 7-Parametertransformation. Diese verschiebt die Lagerung von einem geodätischen Datum in ein anderes Datum. Während das WGS84-System geozentrisch gelagert ist, sind konventionelle Systeme wie das GK-System nicht geozentrisch gelagert, und es ergibt sich eine Verschiebung des Koordinatenursprungs — drei Translationen werden vorgenommen. Hinzu kommt der Maßstabsfaktor, der berücksichtigt, dass die verschiedenen Systeme in unterschiedlichen Maßstäben vorliegen. Außerdem finden drei differentielle Rotationen Beachtung.

Nach der Datumstransformation werden aus den XYZ-Koordinaten ellipsoidische Koordinaten im neuen Datum berechnet. Da in der Praxis meist nicht mit ellipsoidischen Koordinaten gearbeitet wird,

werden diese zusätzlich in ebenen rechtwinkligen Koordinaten abgebildet. In Deutschland handelt es sich bei der üblichen ebenen Abbildung um eine GK-Abbildung. Für die Verebnung von ellipsoidischen Koordinaten müssen Korrekturen an die Messwerte angebracht werden, diese wurden im Abschnitt 3.1.2 bereits behandelt. Zur Berechnung der Höhe muß die Geoidundulation des Messgebietes bekannt sein. Bei den Messungen im Rahmen dieser Arbeit war die Berechnung von Höhen nicht relevant, da die Beschickung der Tiefendaten über einen Pegel vorgenommen wurde.

Der Ablauf der Transformation ist in Abbildung 5.5 dargestellt.

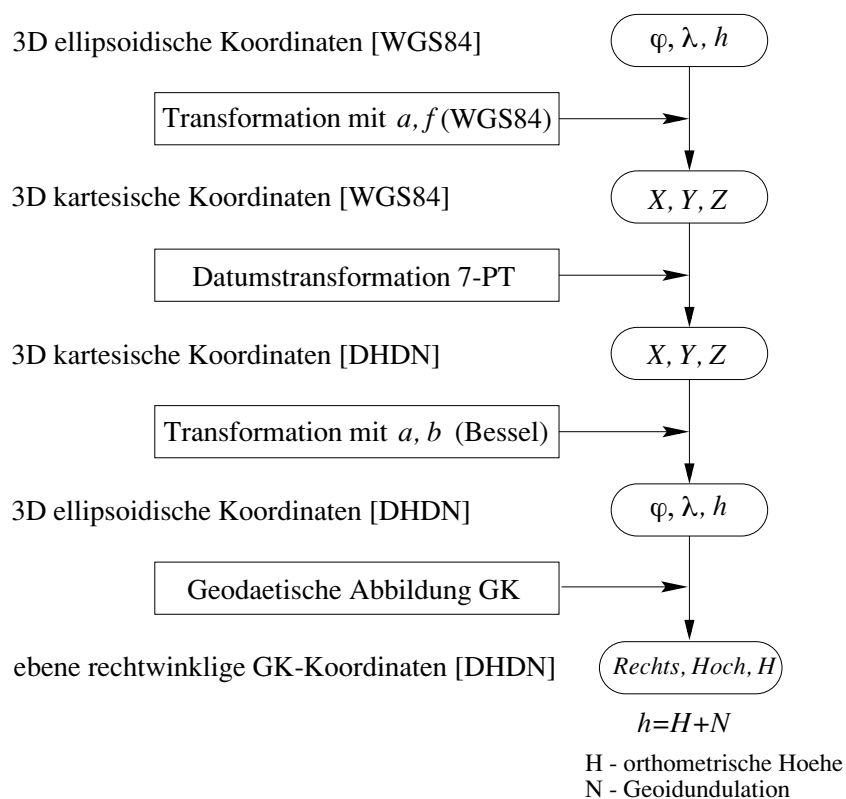


Abb. 5.5: Berechnungsschritte der Transformation von ellipsoidischen Koordinaten im Datum des WGS84 in ebene rechtwinklige GK-Koordinaten des DHDN-Datums (Potsdamdatum), in Anlehnung an [Egge 2000].

Die Transformation findet mit den Programmen `wgs_gk.pro` und `TRWG.pro` statt. `wgs_gk.pro` dient hierbei zum Einlesen der Daten in Vektoren und sorgt für die Ausgabe der Ergebnisse in die Datei `GK_***.dat`. Diese enthält neben den GK-Koordinaten ebenfalls die Ensemblenummer der ADCP-Messung, um die spätere Zuordnung zu den Strömungsdaten zu gewährleisten. `TRWG.pro` wird von `wgs_gk.pro` aufgerufen und transformiert je ein Koordinatenpaar, welches dann an `wgs_gk.pro` zur Speicherung übergeben wird. Das Format der Ausgabedatei erfüllt die in Tabelle 5.5 angegebenen Formatangaben.

Tab. 5.5: Zusammenstellung Datenformat von `GK_***.dat`.

Ensemblenr.	f	Rechtswert [m]	f	Hochwert [m]
I5	6X	D9.1	3X	D9.1

5.2 Verarbeitung der Strömungsdaten

5.2.1 ADCP_Einlese.pro

Das Teilprogramm `ADCP_Einlese.pro` ist dafür zuständig, die ADCP-Daten einzulesen und ensembleweise (also pro Vertikalprofil) das Strömungsmittel zu bilden (Abbildung 5.6).

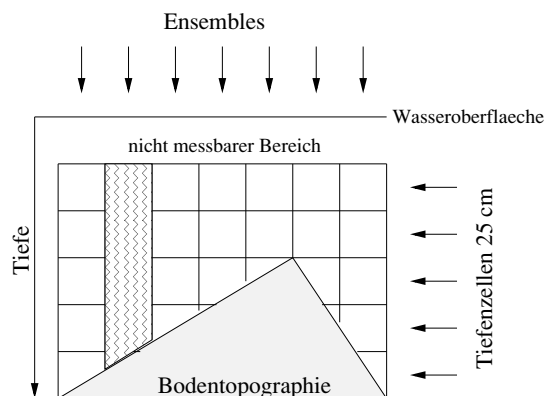


Abb. 5.6: Darstellung des Ensembles-Tiefenzellen-Systems; für jedes Ensemble (Vertikalprofil) werden die Tiefenzellen zu einem Wert gemittelt.

Die Abspeicherung der Ergebnisse erfolgt spaltenweise mit Ensemblenummer, Tagessekunden, maximaler Tiefe und den Strömungsmittelwerten der Komponenten des Strömungsbetrages, der Strömungsrichtung, sowie der Nord-, Ost- und Vertikalkomponenten in die Datei `ADCPM_***.dat`. Vor der Spei-

Tab. 5.6: Zusammenstellung Datenformat von `ADCPM_***.dat`.

EnsNr.	f	TagSek	f	MaxTiefe	f	Betrag	f	Richtung	f	Ost	f	Nord	f	Vertikal
I5	4X	D9.3	3X	D5.2	3X	D6.2	2X	D7.3	2X	D6.1	2X	D6.1	2X	D6.1

cherung werden die Ensemblezeiten vom UTC-Zeitsystem in Tagessekunden MESZ umgewandelt, da die Zeitpunkte der Messung der Kreiselwerte ebenfalls in MESZ gespeichert wurden. Die Strömungskomponenten werden noch nicht wegen der Verdrehung um 90° korrigiert, es handelt sich lediglich um eine Mittelung der aufgezeichneten Rohdaten. Korrekturen und Reduktionen müssen vor der Darstellung noch angebracht werden. Das Format des Dateiaufbaus ist in Tabelle 5.6 dargestellt.

5.2.2 gyro.pro

Der Programmteil `gyro.pro` liest die Profildateien `profil***.raw` der Echolotung aus `DigiNav` ein und ermittelt aus ihnen den jeweils für ein Ensemble gültigen Kreiselkompasswert. Dies ist notwendig, um die aufgrund der während der Messfahrt fehlenden Kurswinkel verfälschten Richtungen der Strömungswerte des ADCP korrigieren zu können.

Die Tagessekunden und Kreiselwerte werden in die ersten beiden Spalten der Datei `gyro_***.dat` ausgegeben. Zusätzlich werden die mittlere Fahrtgeschwindigkeit und der mittlere Kurs eines Profils mit den Werten der VTG Strings berechnet und in die Spalten drei und vier der Datei `gyro_***.dat` ausgegeben. Die Formatierung ist der Tabelle 5.7 zu entnehmen.

Die abgespeicherten Kreiselrichtungen sind mit einem Offset von 180° behaftet, da der Kreiselkompass entgegen der Fahrtrichtung montiert werden musste, um die Zugänglichkeit zu gewährleisten. Eine Korrektur der Kreiselwerte um 180° erfolgt im Programm `gyro.pro`, sodass die in den Ausgabedateien enthaltenen Kreiselwerte keinen durch die Kreiselaufstellung verursachten Offset mehr enthalten.

Tab. 5.7: Zusammenstellung Datenformat von gyro_***.dat.

TagSek[s]	f	Kurswinkel[°]	f	mittlere Fahrt[kn]	f	mittlerer Kurswinkel[°]
D9.3	2X	D5.1	2X	D6.3	2X	I3

Außerdem wird der Kreiselwert aufgrund der Meridiankonvergenz um 0.4° korrigiert (vgl. Abschnitt 3.1.2).

5.2.3 abgleich.pro

abgleich.pro dient dazu, die Daten der verschiedenen Sensoren zeitlich aufeinander abzugleichen. Die Anzahl der Ensembles ist in den Dateien ADCPM_***.dat und GK_***.dat eventuell unterschiedlich. Stimmt die Ensembleanzahl nicht überein, kommt es zu Fehlern in den nachfolgenden Programmen. abgleich.pro stellt sicher, dass die Ensembles in beiden Dateien identisch sind und somit für jedes Ensemble ein Koordinatenpaar vorliegt.

Da die Kreiselwerte aus der DigiNav Aufzeichnung übernommen werden und diese mit der ADCP-Aufzeichnung nicht immer zeitgleich startet, besteht die Möglichkeit, dass nicht für alle Ensembles Kreiselwerte vorhanden sind. Dieser Dateiunterschied wird mit dem Durchlauf dieses Programmes behoben. Als Ergebnisdatei entstehen die Dateien ADCPM_***.dat und GK_***.dat in dem Format, in dem sie auch bisher vorlagen (siehe Tabelle 5.5 und 5.6). Lediglich die Ensembleanzahl wird einander angepaßt.

5.2.4 Stroemung.pro

Die gemittelten Strömungsdaten der Datei ADCPM_***.dat werden mit Stroemung.pro zur Übersicht und Kontrolle der grundsätzlichen Strömungsrichtung in einem Plot (vgl. Abbildung 5.7) dargestellt.

Die Darstellung erfolgt vektoriell von der jeweiligen Schiffsposition aus. Die Strömungsfähnchen weisen in die Strömungsrichtung und ihre Länge ist nach dem Strömungsbetrag skaliert. Die Angabe von mittlerer Strömungsrichtung und -betrag des gesamten Profils erfolgt unterhalb der Abszissenachse. Die Maßstäbe von Abszissen- und Ordinatenachse sind geringfügig unterschiedlich. Es kann dennoch erkannt werden, ob die Strömung bei Flut gen Osten und bei Ebbe gen Westen setzt. Auf gleiche Maßstäbe der beiden Achsen, die mit erhöhtem Programmieraufwand verbunden wären, wurde daher verzichtet.

Die Ermittlung des Kreiselwertes für jedes Ensemble erfolgt mit den Tagessekunden der Ensembles der ADCP-Datei. Diese werden eingelesen und in der Kreiseldatei nach den beiden Zeitwerten gesucht, die diesen Zeitpunkt einschließen. Dies geschieht über die Bildung von Differenzen zwischen der ADCP-Zeit und der Kreisel-Zeit. Sobald das Produkt der Differenzen von Wert(i) und Wert(i+1) negativ wird, erfolgt mittels Dreisatz eine Interpolation, um den Kreiselwert für den ADCP zu errechnen.

Es entsteht ein neuer Vektor mit Kreiselwerten, die zeitlich zu den Tagessekundenwerten der Ensembles passen und ihnen somit zugeordnet werden können. Dieser Vektor mit passend je einem Kreiselwert zu einem Ensemble wird in die Datei Gyrokorr_***.dat geschrieben, deren Dateiformat in Tabelle 5.8 dargestellt wird.

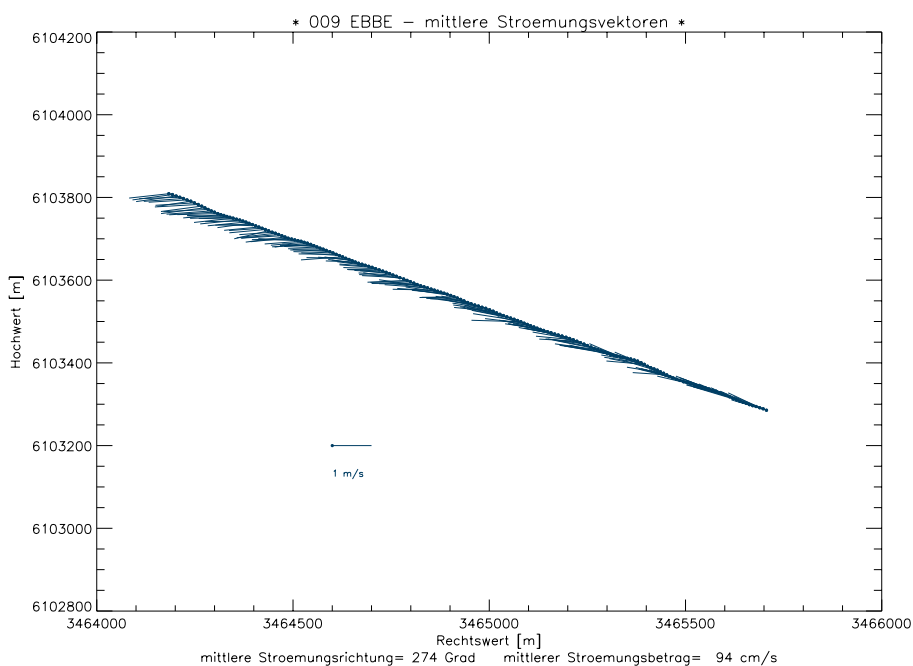


Abb. 5.7: Darstellung einer Stroemung_***.eps-Datei.

Tab. 5.8: Zusammenstellung Datenformat von Gyrokorr_***.dat.

EnsembNr.	f	TagSek[s]	f	korrigierter Kurswinkel[°]
I5	3X	D9.3	3X	D5.1

Die Strömungsrichtungen werden zur korrekten Darstellung um 90° reduziert, mit den Kreiselnwerten berichtigt, und mit ihnen und dem Strömungsbetrag die korrekten Nord- und Ostkomponenten berechnet:

$$\text{Ost}_i = \text{Betrag}_i \cdot \sin(\text{Richtung}_i), \quad (5.3)$$

$$\text{Nord}_i = \text{Betrag}_i \cdot \cos(\text{Richtung}_i). \quad (5.4)$$

Die Darstellung der mittleren Strömungswerte der Vertikalprofile erfolgt vektoriell, sodass die Hauptströmungsrichtung erkannt werden kann. In einer zweiten Grafik erfolgt eine Gegenüberstellung der Echolotung und der ADCP-Maximaltiefen mit Angabe der ersten und letzten Ensemblenummer (Echotest_***.eps, vgl. Abbildung 5.8).

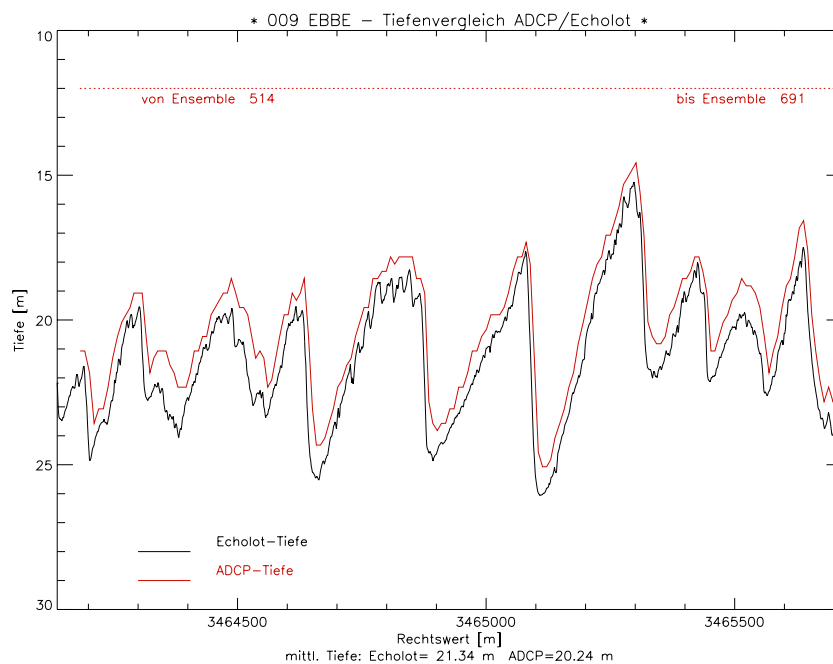


Abb. 5.8: Beispiel einer Echotest_***.eps-Datei.

Die Darstellungen dienen zur Plausibilitätskontrolle der Strömungsergebnisse nach der Umrechnung in Nord- und Ostkomponente. Die Gegenüberstellung der Tiefen hat den Sinn, eventuelle Verschiebungen der Tiefenprofile von ADCP und Echolot aufzudecken, um Klarheit in die Zuordnung von Position und zugehöriger Ensemblenummer zu bringen (vgl. Abschnitt 4.6.1).

5.2.5 darst.pro

Im Programmteil `darst.pro` werden die Messdaten der Tiefenzellen der Ensembles eingelesen, jedoch nicht wie in `ADCP_Einlese.pro` der Mittelwert für jedes Vertikalprofil gebildet. Die einzelnen Strömungswerte bleiben erhalten und werden in Isoliniengrafiken dargestellt. Isoliniengrafiken verwendet]Darstellung des Diese stellen Längsschnitten durch die Wassersäule entlang des gefahrenen Profils dar und machen die Werte der Strömungskomponenten (Betrag, Richtung, Vertikalbewegung sowie die Komponenten senkrecht und parallel zum Verlauf der Sandwellenkämme) der Tiefenzellen sichtbar. Der Programmablauf sowie die entstehenden Dateien sind in der Abbildung 5.9 aufgeführt.

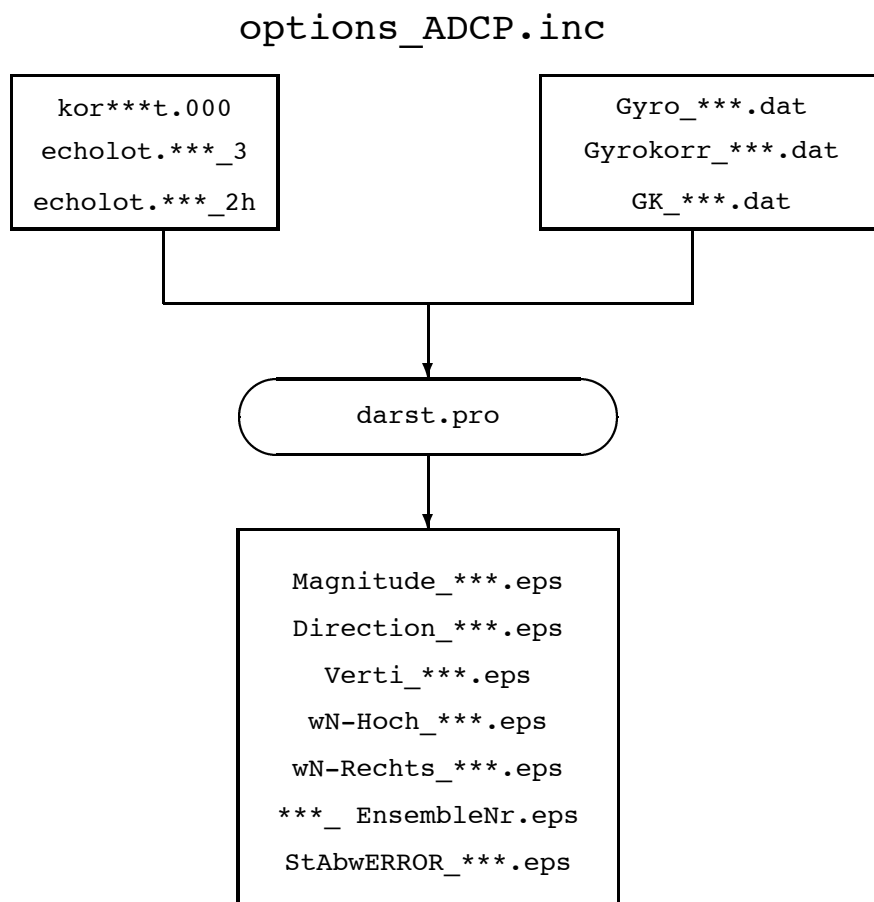


Abb. 5.9: Programmablauf von `darst.pro`.

Da die Überströmung der Sandwellen interessiert, sind die Nord- und Ostkomponenten weniger von Bedeutung. Die größten Strömungsänderungen werden senkrecht und vertikal zu den Sandwellenkämmen erwartet, daher werden die Komponenten dieser Richtungen durch Drehung des Koordinatensystems berechnet. Die Achsen des gedrehten Systems werden bewußt nach dem mathematischen System bezeichnet (die x -Achse ist die Abszissenachse, die y -Achse ist die Ordinatenachse), da `PV-WAVE` mit mathematischen Polarwinkeln rechnet und so Verwirrung bezüglich der Drehrichtung vermieden werden soll.

Durch Berechnung der beiden Komponenten bei Drehwinkeln von $10 \dots 100^\circ$ in 10° -Schritten gegen den Uhrzeigersinn werden Isoliniendarstellungen erzeugt, aus denen die Darstellungen des optimalen Winkels ausgewählt werden können. In den Dateinamen der Darstellungen wird im Ablaufdiagramm ein „w“ als Platzhalter für die Angabe des Drehwinkels eingesetzt. `70N-Hoch_***.eps` und `70N-Rechts_***.eps` heissen beispielsweise die beiden Plotfiles, welche die x - und y -Komponente bei einem um 70° gedrehten Koordinatensystem ergeben.

Zur Berechnung der Drehung werden zunächst Nord- und Ostkomponenten nach vorhergehender Berichtigung der Strömungsrichtung um 90° wie in Abschnitt 5.2.4 berechnet und anschließend die Rotation des Koordinatensystems durch ebene Koordinatentransformation vorgenommen, sodass sich die neuen x - und y -Komponenten ergeben.

Da es keine Nullpunktverschiebung zwischen den beiden Systemen gibt (das Schiff ist in beiden Systemen [Nord-Ost-System und y - x -System] der Koordinatenursprung), handelt es sich lediglich um eine Rotation um den Koordinatenursprung. Nach den Formeln für die ebene Koordinatentransformation folgt [Baumann 1995]:

$$y_i = \text{Nord}_i \cos \varepsilon - \text{Ost}_i \sin \varepsilon \quad (5.5)$$

$$x_i = \text{Nord}_i \sin \varepsilon + \text{Ost}_i \cos \varepsilon, \quad (5.6)$$

wobei:

y_i, x_i :	Koordinatenpaar des Punktes P_i im Zielsystem
$\text{Nord}_i, \text{Ost}_i$:	Koordinatenpaar des Punktes P_i im Startsystem
ε :	Drehwinkel.

Der Drehwinkel kann entweder in der Datei `options_ADCP.inc` eingestellt werden oder es werden automatisch alle Werte von einem bestimmten Winkel bis 100° in 10° -Schritten berechnet. Die Drehung erfolgt gegen den Uhrzeigersinn. Die in der Ozeanographie getroffene Vereinbarung, dass Strömung nach Osten oder Norden mit positiven Werten dargestellt wird, soll erhalten bleiben, daher werden die Vorzeichen der y -Achse nach der Berechnung der neuen Komponenten umgedreht.

Zur Erzeugung der Isoliniendarstellungen (vgl. Abbildung 5.10) jeweils einer Komponente werden alle ihre Werte eines Profils (alle Ensembles) in eine 'Komponenten'-Matrix aufgenommen. Die Darstellung erfolgt mit der `PV-wave`-Funktion `CONTOUR`. Diese verlangt aufsteigende Werte in der unabhängigen Größe (Rechtswert).

Da die Profile sowohl in Ost-West als auch in West-Ost-Richtung gefahren wurden, werden die Datensätze vor der Darstellung je nach Profil gegebenenfalls neu sortiert. Es ergibt sich je eine Abbildung für Strömungsrichtung, Strömungsbetrag und Vertikalbewegung, da diese vom Drehwinkel unabhängig sind.

Die Grafiken für x - und y -Komponente werden für alle gewünschten Winkel erzeugt und der jeweilige Drehwinkel und die Bezugsachse bei der Darstellung im Plot auf der rechten Seite über der Farbskala dargestellt. Die Achse, auf welche sich der Isolinenplot bezieht, ist rot und fett gezeichnet (Abbildung 5.10). Die Darstellung beschränkt sich auf den Tiefenbereich ab 2.32 m, da der ADCP-Schwinger auf 1.70 m Tiefe angebracht war.

Neben den Isoliniengrafiken des Längsschnittes wird für jedes Ensemble eine Darstellung erzeugt, die die Draufsicht auf die Verteilung der Strömungsrichtungen zeigt (Datei `***_Ensemblenummer.eps`). Die Strömungsrichtungen werden vektoriell anhand ihrer Nord- und Ostkomponenten dargestellt und die Länge des Vektors durch die Größe des Strömungsbetrages bestimmt (Abbildung 5.11). Die Farben der

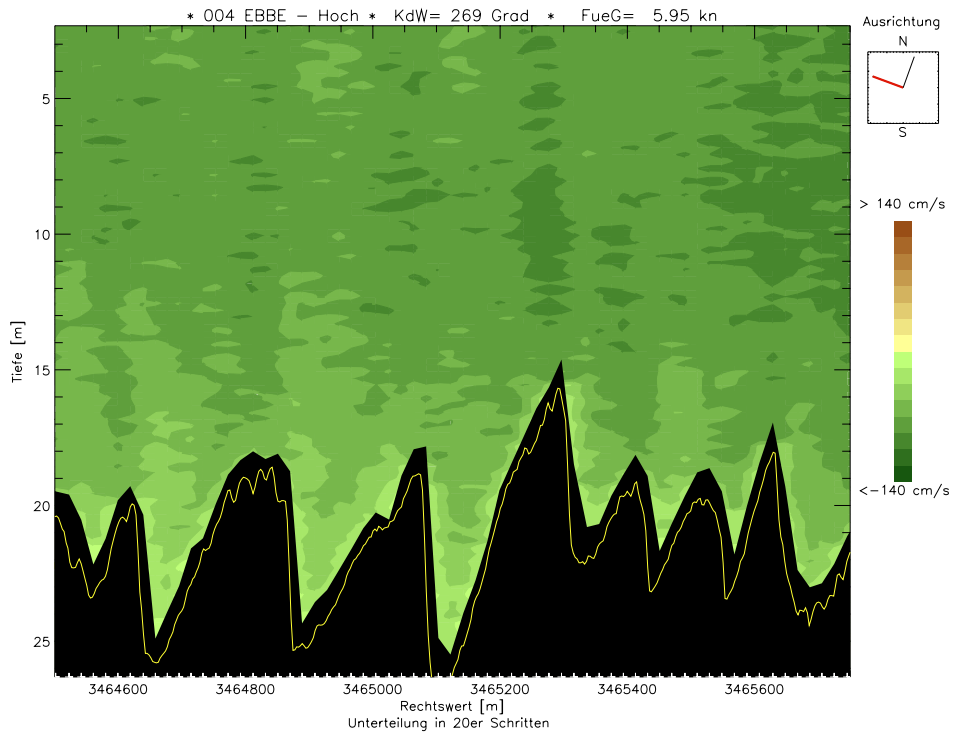


Abb. 5.10: Darstellung eines Isolinienplots der y-Komponente für den Drehwinkel 70° .

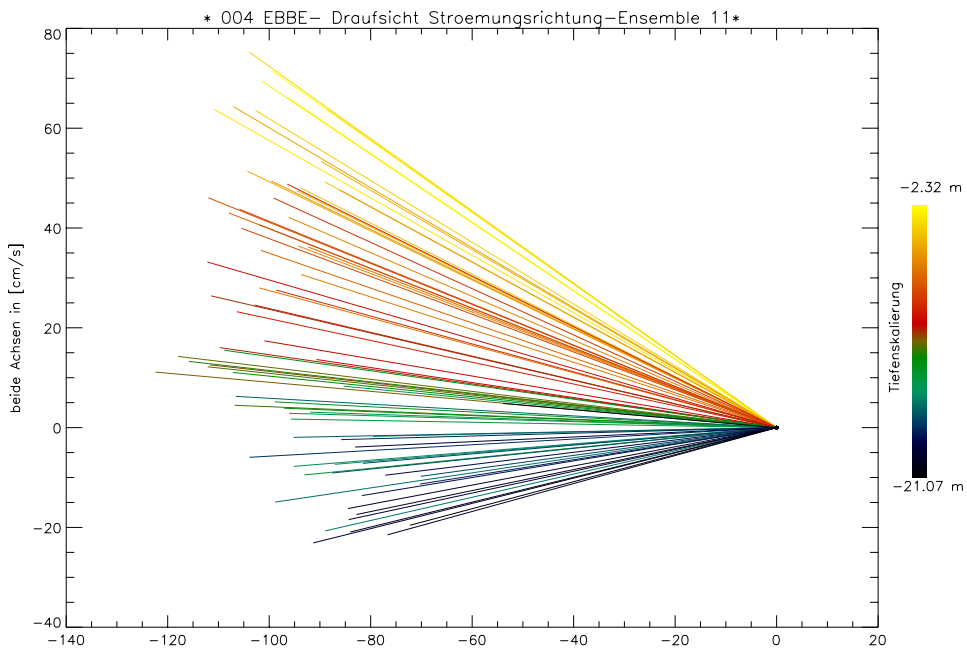


Abb. 5.11: Beispiel einer durch `darst.pro` erzeugten Draufsicht der Strömungen eines Ensembles (Farbskalierung nach der Tiefe).

Vektoren sind nach der Tiefe skaliert (die Zuordnung ist der Skala auf der rechten Seite zu entnehmen). Es wird deutlich, dass die Strömungsrichtung mit zunehmender Tiefe gegen den Uhrzeigersinn dreht.

Um die Größe der zufälligen Fehler abschätzen zu können, werden die Standardabweichungen der Geschwindigkeiten über jeweils ein komplettes Ensemble herangezogen und als Plotfile `StAbwERROR_***.eps` ausgegeben. Wie in Abbildung 5.12 aufgezeigt, werden die Standardabweichungen nach ihrem Rechtswert aufgetragen und der Mittelwert der Standardabweichung unterhalb der Abszissenachse ausgegeben.

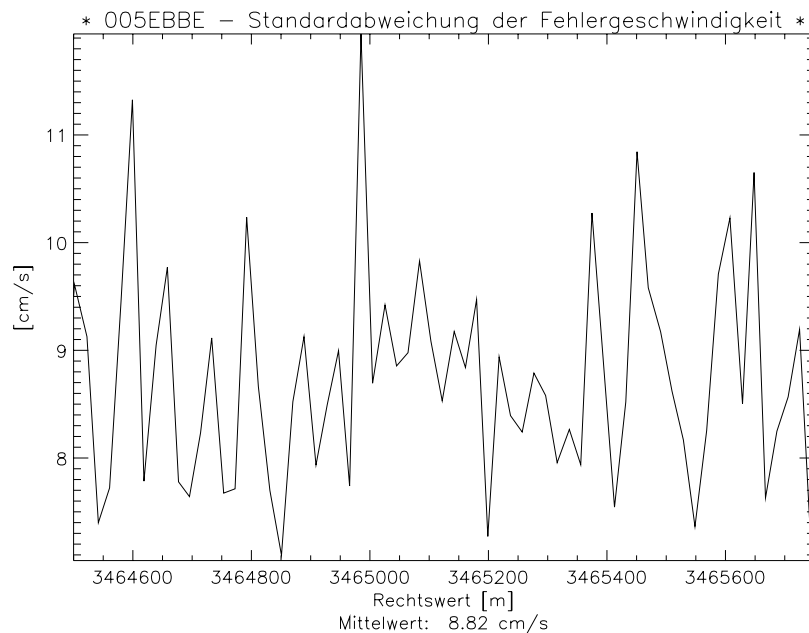


Abb. 5.12: Beispiel einer `StAbwERROR_***.eps`-Datei.

Sehr hohe Ausschläge (Peaks) der Standardabweichung deuten auf fehlerhafte Ensembles, die vor allem bei gehäuftem Auftreten gelöscht oder verbessert werden müssen. Im Rahmen dieser Arbeit sind mittlere Fehlergeschwindigkeiten von bis zu 13 cm/s aufgetreten. Diese wurden jedoch nicht korrigiert, da eine Korrektur nur von Hand vorgenommen werden kann und eine eingehende Fehlersuche vorangehen muss. Dies ist sehr zeitaufwendig und würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Aus diesem Grunde werden stark fehlerhafte Profile bei der Datenanalyse nicht verwendet.

5.2.6 gradient.pro

Der Programmablauf von `gradient.pro` (Abbildung 5.13) entspricht vom Prinzip dem des Programms `darst.pro`. Der Unterschied liegt darin, dass Isoliniengrafiken der Gradienten der jeweiligen Komponente erzeugt werden. Der Gradient zeigt die Änderung einer Größe innerhalb einer Strecke (∂ Messwert/ ∂ Rechtswert) an. Ändert sich beispielsweise der Strömungsbetrag auf 10 m Strecke um 1 m/s, beträgt der Gradient des Betrags $\frac{1}{10 \text{ sek.}}$.

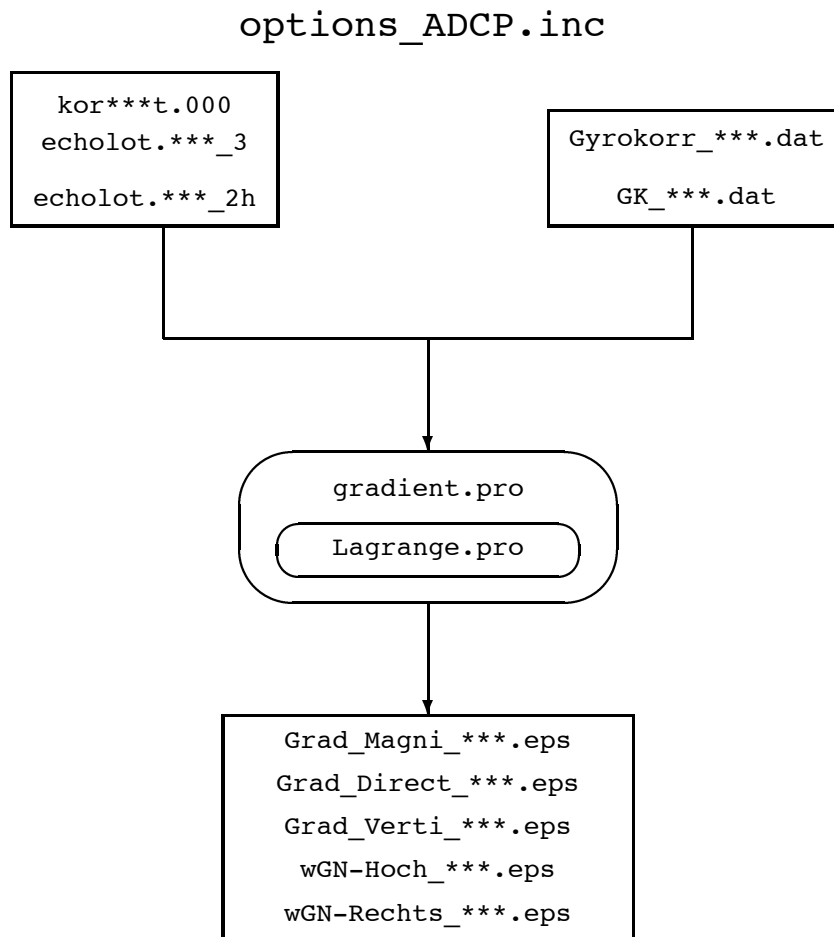


Abb. 5.13: Programmablauf von `gradient.pro`.

Zur Berechnung des Gradienten wurde zunächst die Funktion `DERIV` von `PV-Wave` benutzt. Diese bildet die erste Ableitung einer Funktion. Nach einigen Tests ergab sich jedoch, dass diese Funktion bei Verwendung von ungleichabständigen Stützstellen falsch rechnet, was nach eingehender Überprüfung durch den Support von `PV-Wave` schließlich bestätigt wurde. Da bei einer Profifahrt nicht davon ausgegangen werden kann, dass immer gleichabständige Stützstellen vorliegen, musste ein neues Programm geschrieben werden, welches die Berechnung der Werte der ersten Ableitung bei ungleichabständigen Stützstellen übernehmen kann. Verwirklicht wurde dies mit dem Programm `Lagrange.pro`, das von `gradient.pro` aufgerufen wird. Bei dieser Berechnung wird die drei-Punkt-Lagrange-Interpolation zur Bestimmung des Funktionswertes durch jeweils drei Stützstellen (t_0, t_1, t_2) benutzt [Bronstein u.a. 1999].

Die Lagrange-Interpolation hat den Vorteil, dass die Berechnung gleichermaßen für die Bestimmung der Funktion bei gleichabständigen wie bei ungleichabständigen Stützstellen verwendet werden kann. Sie dient dazu, durch $n+1$ Punkte ein Polynom vom Grade n zu legen. Im Fall der drei-Punkt-Interpolation handelt es sich also um drei Punkte und somit ein Polynom zweiten Grades (5.12). Die Summe der gewichteten Stützwerte wird als Interpolationspolynom angesetzt.

$$s^*(t) = \sum_{i=0}^n L_i s_i \quad (5.7)$$

Dabei bezeichnen L_i die sogenannten Lagrangeschen Grundpolynome. Um zu gewährleisten, dass (5.7) an der jeweiligen Stützstelle t_i als Funktionswert den Stützwert s_i annimmt, müssen die Lagrangeschen Polynome so beschaffen sein, dass sie an der Stützstelle t_i alle zu null werden, außer dem Polynom L_k zur Stützstelle t_k , welches dort den Wert 1 annehmen muß. Die Bedingung lautet:

$$L_k(t) = \begin{cases} 1 & : t = t_k \\ 0 & : t \neq t_k \end{cases} \quad (5.8)$$

Dies bedeutet, dass beispielsweise an der Stützstelle $t=t_1$ $L_1=1$ und die übrigen L_i , also L_0 und L_2 , 0 sein müssen, damit $s^*(t)$ an der Stelle $t=t_1$ den Stützwert s_1 ergibt.

Die Lagrangeschen Grundpolynome ergeben sich bei der drei-Punkt-Interpolation als:

$$\begin{aligned} L_0(x) &= \frac{(x-t_1)(x-t_2)}{(t_0-t_1)(t_0-t_2)}, \\ L_1(x) &= \frac{(x-t_0)(x-t_2)}{(t_1-t_0)(t_1-t_2)}, \\ L_2(x) &= \frac{(x-t_0)(x-t_1)}{(t_2-t_0)(t_2-t_1)}. \end{aligned} \quad (5.9)$$

Mit den Grundpolynomen ergibt sich

$$s^*(t) = \frac{(x-t_1)(x-t_2)}{(t_0-t_1)(t_0-t_2)} \cdot s_0 + \frac{(x-t_0)(x-t_2)}{(t_1-t_0)(t_1-t_2)} \cdot s_1 + \frac{(x-t_0)(x-t_1)}{(t_2-t_0)(t_2-t_1)} \cdot s_2 \quad (5.10)$$

Wird (5.10) nach Potenzen sortiert, entsteht

$$\begin{aligned} s^*(t) &= - \frac{(-s_1 t_2 + s_1 t_0 - s_0 t_1 + s_0 t_2 + s_2 t_1 - s_2 t_0)}{(t_1 - t_0)(t_1 - t_2)(t_2 - t_0)} \cdot x^2 \\ &+ \frac{(-s_0 t_1^2 + s_0 t_2^2 + s_1 t_0^2 - s_1 t_2^2 - s_2 t_0^2 + s_2 t_1^2)}{(t_1 - t_0)(t_1 - t_2)(t_2 - t_0)} \cdot tx \\ &+ \frac{t_1^2 t_2 s_0 - t_1 t_2^2 s_0 - t_0 t_1^2 s_2 + t_0^2 t_1 s_2 + t_0 t_2^2 s_1 - t_0^2 t_2 s_1}{(t_1 - t_0)(t_1 - t_2)(t_2 - t_0)} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Dies entspricht der Form des Polynoms zweiten Grades

$$f(x) = a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0 \quad (5.12)$$

Die Berechnung der Gradientenwerte erfolgt nun durch Bildung der ersten Ableitung der berechneten Funktion $s^*(t)$ (5.11). Es ergeben sich die Gradientenwerte der Messgröße für den Funktionswert x , in diesem Fall dem Ort (Rechtswert) der ADCP-Strömungsmessung.

$$f'(x) = 2a_2 x + a_1 \quad (5.13)$$

Da die Strömungsgeschwindigkeiten aus der Messung in cm/s vorliegen, werden sie vor Berechnung des Gradienten in m/s umgerechnet. Es ergibt sich somit für die Gradienten von Betrag, x -, y - und Vertikal-Komponente eine Einheit von $[s^{-1}]$ und für die Richtungskomponente $[^{\circ}/m]$.

Zusätzlich können Diagramme der Gradienten der einzelnen Komponenten auf einer bestimmten Tiefe gezeichnet werden. Diese Funktion wurde eingebaut, um speziell für die minimalen Tiefen die Gradienten darstellen und in Verbindung zur Topographie betrachten zu können (MDVOB_***.eps und w-SPOb_***.eps).

Die Ergebnisse der Gradienten auf einer Tiefe von etwa 4 m lassen keine eindeutigen Schlüsse auf die Verbindung von Oberflächengradient und Topographie zu und werden daher nicht weiter betrachtet. Eine Darstellung der Gradienten an der Wasseroberfläche ist bei schiffsgestützten ADCP-Daten ohne eine Extrapolationsfunktion nicht möglich und wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt.

5.3 Echolotung

5.3.1 Hang.pro

Wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, müssen die Tiefenwerte einer Echolotung bei vorhandenen Hängen (wie z. B. Böschungen oder Sandwellen) wegen Hangneigung korrigiert werden. Die Sandwellen nördlich von Sylt sind mit ca. 8 m relativ hoch und weisen starke Steigungen auf, sodass die Anbringung der Hangneigungskorrektur notwendig wird (vgl. Abbildung 5.14). Aus Abbildung 5.14 ist zu entnehmen,

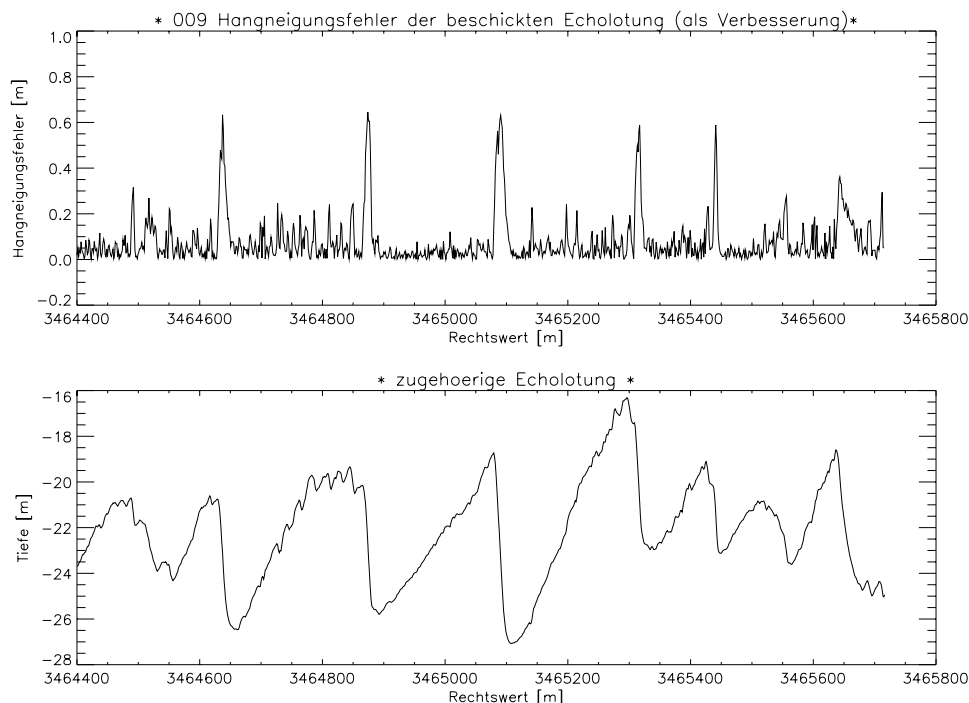


Abb. 5.14: Abbildung der Hangneigungsfehlers bei unterschiedlichen Steigungen eines Profils Hang3_***.eps.

dass der Hangneigungsfehler bei diesem Profil in den steilen Bereichen eine Größenordnung von bis zu 0.7 m erreicht.

Das Programm `Hang.pro` korrigiert die Daten der Dateien `echolot.***_3` und `echolot.***_2`, bei welchen es sich um bearbeitete Dateien der Echolotung handelt. Erstere beinhalten die unbeschiedten Echolotungen, deren Positionen noch nicht wegen Ablage des Echolotschwingers zur positionsgebenden Antenne korrigiert sind. `echolot.***_3` enthält hingegen die beschiedten Tiefen und wegen Ablage korrigierte Positionen.

Die Speicherung der korrigierten Daten erfolgt in die beiden Dateien `echolot.***_3h` und `echolot.***_2h`, deren Datenformat in Tabelle 5.9 aufgezeigt wird. Die Formatangabe A steht für Zeichen (character). Andere Formatangaben wurden in Abschnitt 5.1.1 bereits erläutert.

Tab. 5.9: `echolot.***_3h` und `echolot.***_2h`.

Datum	f	Uhrzeit	f	Rechts	f	Hoch	f	Tiefe	f	Kreisel
A8	1X	A9	1X	D11.2	1X	D11.2	2X	D7.2	2X	D6.1

Die Daten von `echolot.***_2h` übernehmen die Darstellung der Echolotung in den Isolinienplots der Strömungskomponenten, da es sich bei den ADCP-Tiefen um unbeschiedte Tiefen handelt. `echolot.***_3h` kommt bei der Bestimmung der Sandwellenlängen und -steigungen zum Einsatz (vgl. Kapitel 6). Das Programm gibt außerdem `Hang3_***.eps` und `Hang2_***.eps` aus, welche die Größenordnung des Hangneigungsfehlers bei den unterschiedlichen Steigungen aufzeigen.

5.3.2 Echolotung_Main.pro

Die Echolotung wurde zeitgleich zur ADCP-Messung auf denselben Profilen durchgeführt. Mit dem Programm `Echolotung_Main.pro` werden die Echolotungsdaten der `echolot.***_3h` aller Profile eingelesen und nach Tide und Fahrtrichtung sortiert einander in vier verschiedenen Grafiken gegenübergestellt. Aus diesen Darstellungen sollen die Längen und Höhen der Sandwellen sowie der überlagernden Rippel bestimmt werden. Ein Abbildungsbeispiel sowie die Bestimmung folgt im Kapitel 6.

Der Programmablauf ist Abbildung 5.15 zu entnehmen.

options_Echolot.inc

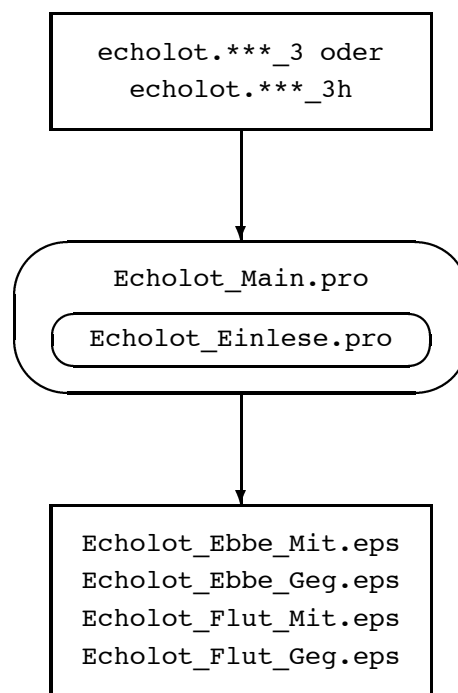


Abb. 5.15: Programmablauf von `Echolot_Main.pro`.

5.3.3 Track_Main.pro

Der Programmteil `Track_Main.pro` dient zur Darstellung der Tracks aller Profilfahrten, ähnlich der Darstellung der Echolotungen (siehe Abschnitt 5.3.2). Die Grafiken sind ebenso jeweils nach Tide und Fahrtrichtung sortiert.

Es wird zwischen ADCP- und Echolottracks unterschieden, da diese beiden Sensoren an Bord nicht die selbe Position hatten. Eventuelle Fehler bei umgerechneten Echolotpositionen können im Vergleich mit den ADCP-Positionen aufgedeckt werden. Bei der Farbwahl der Darstellung wurde darauf geachtet, dass die selben Farbzuordnungen wie in `Echolotung_Main.pro` verwendet wurden, sodass auch diese Zuordnung bei der Auswertung der Grafiken erleichtert wird.

Bei der Grafik wird als Abszissenwert der Rechtswert der GK-Position benutzt, um darzustellen, dass an dieser Position eine Abweichung der Größenordnung lot_i vorhanden war (Abbildung 5.16).

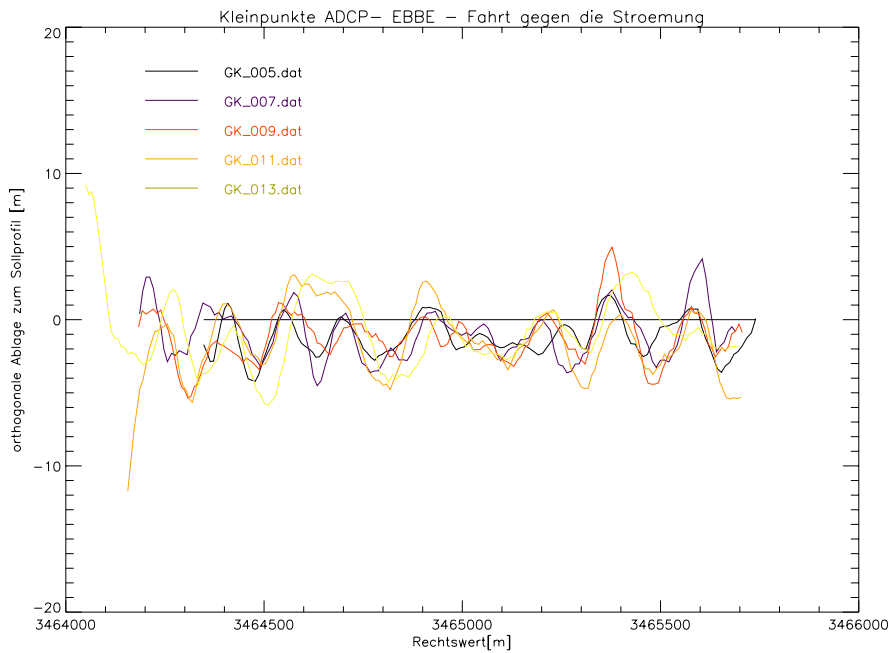


Abb. 5.16: Beispiel eines ADCP-Trackplots, ADCP_Track_Ebbe_Geg .eps.

Zur Darstellung der Abweichungen vom Sollprofil wurden die GK-Koordinaten mit umgekehrter Kleinpunktberechnung in Ordinaten- und Abszissenwerten zum Sollprofil berechnet. Da das Profil von West nach Ost verlaufend definiert wird, ergeben sich nach der Kleinpunktberechnung die Abweichungen nach Norden hin als negativ, Abweichungen nach Süden hin als positiv. Um in der normalerweise nordorientierten Darstellung keine Verwechslung zu schaffen, werden in dem Programm die Vorzeichen der Abweichungen gedreht, sodass nördliche Abweichungen positiv und südliche Abweichungen negativ dargestellt werden können.

Die Formeln zur Kleinpunktberechnung lauten [Baumann 1994]

$$Y_i = Y_A + o \text{ fuss}_i + a \text{ lot}_i \quad (5.14)$$

und

$$X_i = X_A + a \text{ fuss}_i - o \text{ lot}_i, \quad (5.15)$$

wobei:

- Y_i : Y-Koordinate des Punktes (Rechtswert)
- X_i : X-Koordinate des Punktes (Hochwert)
- Y_A : Y-Koordinate des Anfangspunktes (Hochwert)
- X_A : X-Koordinate des Endpunktes (Hochwert)
- lot_i : Lotabstand zur Berechnungslinie
- fuss_i : Strecke zum Fußpunkt auf der Berechnungslinie
- o : Transformationsparameter
- a : Transformationsparameter.

Es ergibt sich bei einer Auflösung nach $fuss_i$:

$$fuss_i = \frac{o(Y_i - Y_A) + a(X_i - X_A)}{(o^2 + a^2)}. \quad (5.16)$$

Hierbei werden zunächst o und a nach

$$o = \frac{Y_E - Y_A}{s} \quad (5.17)$$

und

$$a = \frac{X_E - X_A}{s} \quad (5.18)$$

berechnet. Bei s handelt es sich um die aus Koordinaten gerechnete Strecke, da keine gemessene Strecke vorhanden ist und somit auch kein Maßstabsfaktor bestimmt werden kann. Nach der Berechnung von $fuss_i$ ergibt sich für lot_i durch Einsetzen in (5.14)

$$lot_i = \frac{Y_i - Y_A - ofuss_i}{a}. \quad (5.19)$$

Der Programmablauf und die Benennung der Ausgabedateien ist der Abbildung 5.17 zu entnehmen.

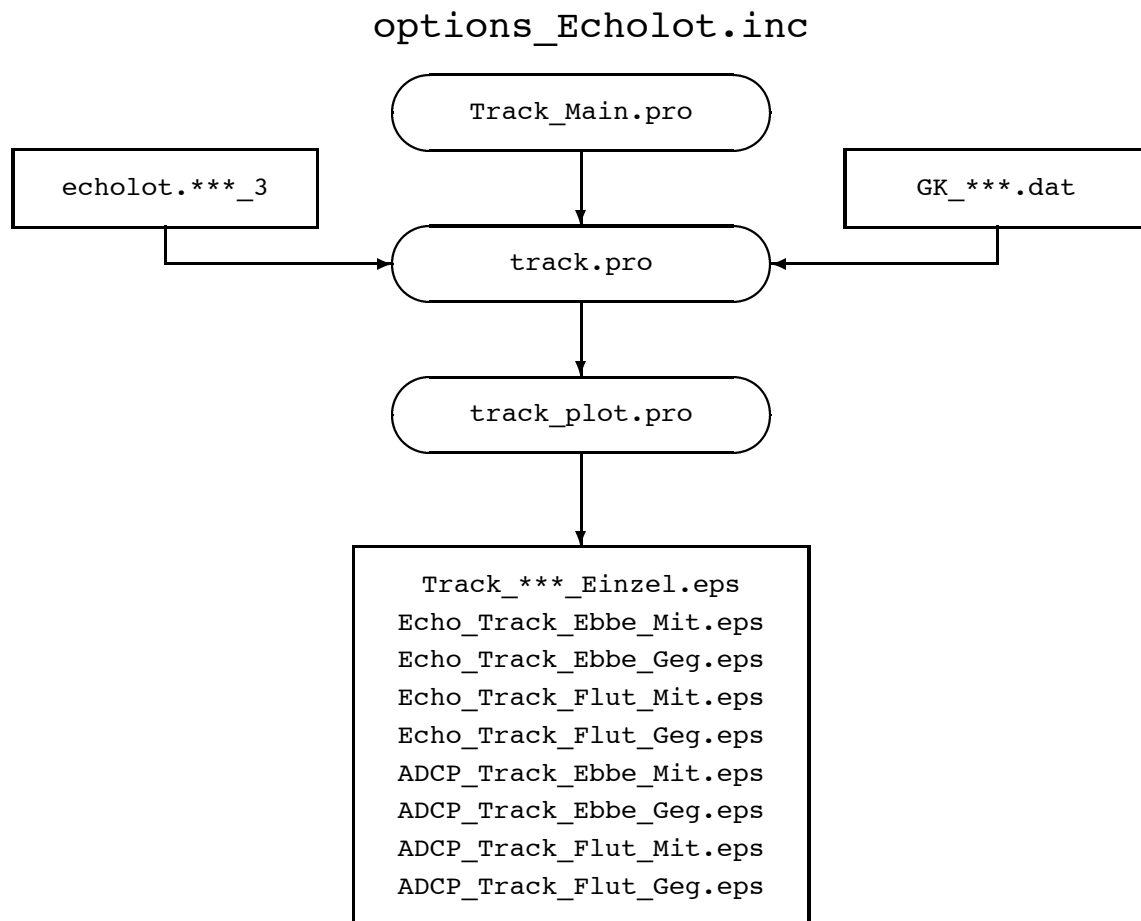


Abb. 5.17: Programmablauf von Track_Main.pro.

6 DATENANALYSE UND VERGLEICH

Im Folgenden wird die Struktur der Bodentopographie näher untersucht. Theoretische Überlegungen zum Strömungsverhalten folgen und werden anhand der Messergebnisse überprüft und ihre Bedeutung für die Radarmessungen dargelegt.

6.1 Sandwellenstruktur

Der Begriff „Sandwelle“ wird im allgemeinen zur Bezeichnung jeglicher Meeresbodenmerkmale verwendet, von kleinen Bodenwellen mit wenigen Zentimetern Höhe bis hin zu großen Sandbänken mit Höhen von über 10 m. In der Sedimenttechnik werden diese unter dem Oberbegriff Bodenform (bedform) zusammengefasst [Allan 2000]. Im allgemeinen werden die Bodenformen auf der Basis ihrer Wellenlängen und Wellenhöhen (oder Amplitude) klassifiziert. Nachfolgend wird die Nomenklatur für Bodenformen von [Gass und Course-Team 1984] benutzt (Tabelle 6.1).

Tab. 6.1: Nomenklatur für Bodenformen [Gass und Course-Team 1984].

Name	Wellenhöhe	Wellenlänge
Rippel	typischerweise weniger als 100 mm	Funktion der Korngröße und Bodenorbitalgeschwindigkeit
Megarippel	0.4 ... 1.5 m	0.6 ... 30 m
Sandwelle	1.5 ... 25 m	typischerweise 30 ... 50 m, aber 1 km oder mehr sind möglich
Sandbank	5 ... 50 m	einzeln oder in Gruppen auftretende Besonderheit

Die Struktur des ADCP-Profiles beinhaltet sieben große Sandwellen, die von West nach Ost mit den Nummern S0 – S6 (Abbildung 6.1) bezeichnet wurden. Diese weisen Höhen von 1.50 ... 11.50 m und Wellenlängen von etwa 95 ... 230 m auf. Die großen Sandwellen sind mit Megarippeln überlagert, die durchschnittlich eine Wellenlänge von 9 m und eine Wellenhöhe von 0.5 m haben. Sie treten vorwiegend auf den relativ flachen Anstiegsseiten (ca. 6 % Steigung) und den Senken der großen Sandwellen auf. Im Bereich besonders flacher Sandwellenkämme (S1 und S2) finden sich besonders ausgeprägte Megarippel mit Wellenlängen von etwa 18 m und Höhen von circa 1 m.

Zur Bestimmung der Wellenlängen und Höhen wurden die Abbildungen der digitalen Daten der Echolotung herangezogen (echo1ot.***_3h). Um eine eventuelle Abhängigkeit der Steigungen bzw. der Sandwellenformen von der Tidephase erkennen zu können, wurden die Profile nach Ebb- und Flutprofilen getrennt benutzt. Die weitere Trennung in mit und gegen die Strömung gefahrene Profile hat

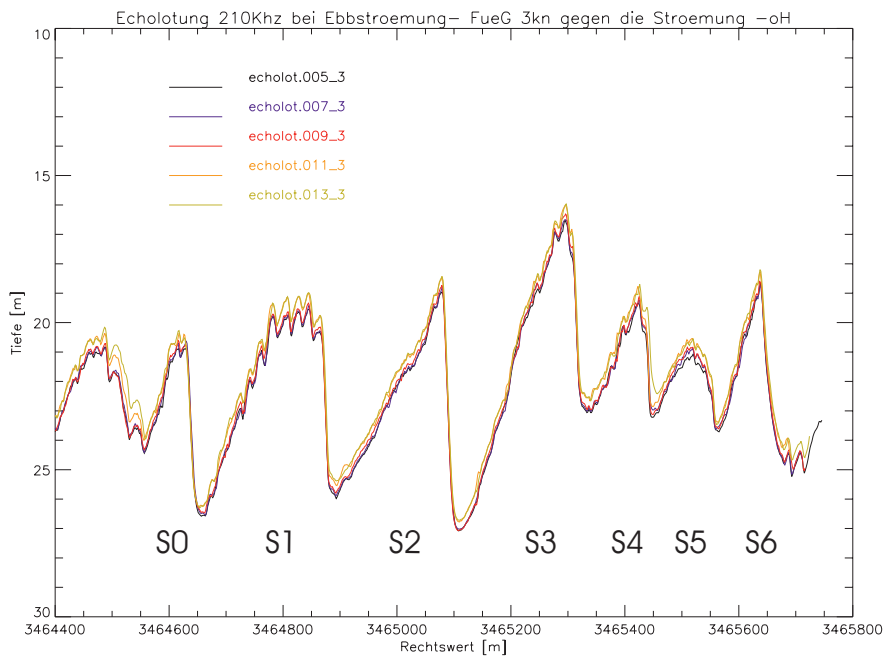


Abb. 6.1: Bezeichnung der Sandwellen von S0 – S6.

sich als unnötig erwiesen, da keine auffallenden Unterschiede in den Tiefenmessungen festgestellt wurden. Die Ergebnisse wurden durch arithmetische Mittelung zusammengefasst und sind in der Tabelle 6.2 wiedergegeben.

Tab. 6.2: Wellenlängen λ und -höhen δH der Sandwellen.

EBBE						FLUT					
Welle	λ	δH Anstieg		δH Abfall		Welle	λ	δH Anstieg		δH Abfall	
		[m]	[%]	[m]	[%]			[m]	[%]	[m]	[%]
S0	100.6	4.0	6	6.2	21	S0	95.2	3.8	6	6.7	22
S1	225.5	7.7	4	7.0	18	S1	230.9	7.7	4	6.9	19
S2	222.9	7.2	4	8.5	29	S2	224.3	7.1	4	8.4	30
S3	224.3	11.5	6	6.9	20	S3	226.7	11.0	6	6.7	21
S4	114.8	3.7	4	4.5	18	S4	112.5	3.6	4	4.4	20
S5	116.0	1.6	4	3.5	9	S5	115.4	3.1	4	3.5	9
S6	119.0	5.5	8	6.9	16	S6	115.4	5.9	8	6.9	16

Die geringfügigen Unterschiede zwischen den Ebb- und Flutprofilen resultieren aus der Ungenauigkeit der Bestimmung der Wellenlängen und -höhen durch manuelles Abgreifen aus einer Grafik und durch Beschickungsfehler. Bei Betrachtung der sich ergebenden Steigungen sind zwischen Ebbe und Flut keine signifikanten Unterschiede der Sandwellensteigungen erkennbar, sodass sich sagen lässt, dass die Sandwellen unabhängig von der Strömungsrichtung in ihrer Form konstant sind.

Nach ihrer Form können Sandwellen in symmetrische und asymmetrische Sandwellen unterschieden werden. Asymmetrische Sandwellen werden weiterhin in ebb- und flutorientierte Sandwellen geteilt. Die jeweilige Orientierung gibt an, ob die steilere Sandwellenseite bei Ebbe oder bei Flut im Strömungslee liegt (Abbildung 6.2). Das Messgebiet läßt sich nach Betrachtung dieses Formmerkmals in drei Bereiche einteilen. Im nördlichen Gebiet prägen ebborientierte, im südlichen flutorientierte Sandwellen die Bodentopographie. In einem schmalen Bereich zwischen diesen treten als Übergang symmetrische Sandwellen auf. Das Gebiet der flutorientierten Sandwellen nimmt die größte Fläche ein und weist die ausgeprägtesten Sandwellen auf. In diesem Gebiet der flutorientierten Sandwellen liegt das ADCP-Profil.

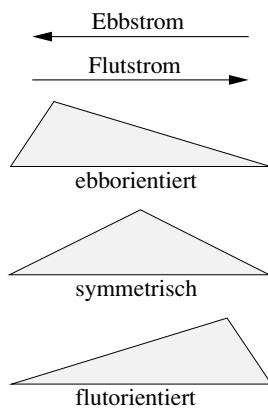


Abb. 6.2: Unterscheidung in symmetrische, ebb- und flutorientierte Sandwellen: im Norden des Messgebietes existieren ebborientierte Sandwellen, diese wandeln sich nach Süden hin über symmetrische in flutorientierte Sandwellen im Süden.

Die Kämme der Sandwellen verlaufen im gesamten Messgebiet wellenförmig (Abbildung 6.3) und variieren daher in ihrer Ausrichtung (Winkel zwischen dem Sandwellenkamm und der Nordrichtung).

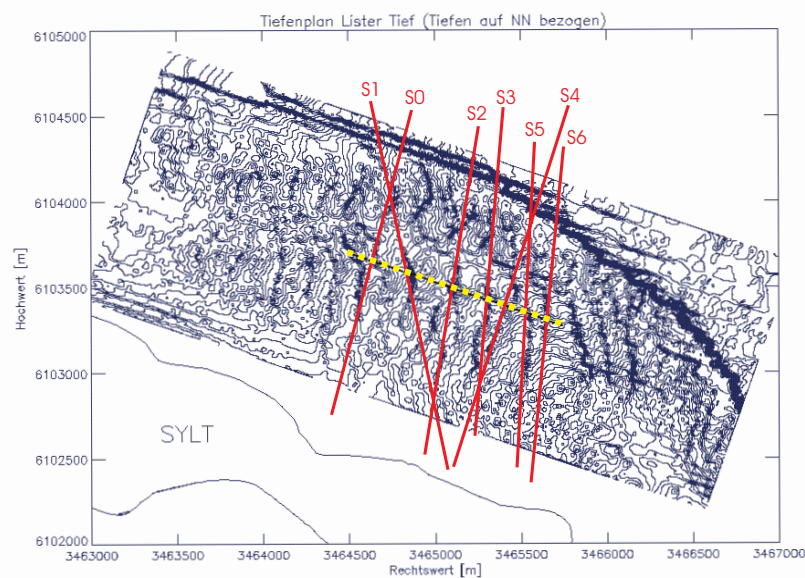


Abb. 6.3: Isolinien-darstellung des Messgebietes zur Bestimmung der Ausrichtung der Kämme (durchgezogene Linien) der Sandwellen im Bereich des ADCP-Profiles (gestrichelte Linie).

Um diesbezüglich dennoch eine Aussage machen zu können, wurde die Ausrichtung speziell für den Bereich des benutzten Profils bestimmt und variiert bei S0 – S6 etwa im Bereich zwischen 350° und 18° (Tabelle 6.3).

Tab. 6.3: Ausrichtung und Tiefen der Käme der Sandwellen auf dem Profil.

Welle	Ausrichtung	gemittelte Tiefe
S0	15°	20 m
S1	350°	18.5 m
S2	10°	18.5 m
S3	5°	15.5 m
S4	18°	18.9 m
S5	3°	20 m
S6	6°	17.8 m

Für den Großteil der betrachteten Sandwellen kann in der weiteren Bearbeitung vereinfachend eine Ausrichtung von +10° gegen die Nordrichtung angenommen werden, sodass für die Abbildung der Strömung der senkrechten und parallelen Komponente bei etwa 80° Drehung gegen den Uhrzeigersinn die besten Ergebnisse zu erwarten sind.

Die Tiefen der Käme wurden unter Zuhilfenahme der hangkorrigierten beschickten Echolotungen durch Mittelung aller Tidephasen bestimmt und liegen zwischen 20 m und 15.5 m (Tabelle 6.3). Die geringsten Tiefen und damit die kleinste Wassersäule über sich haben die Käme der Sandwellen S3 und S6, welche die tiefer liegenden Käme von S4 und S5 einrahmen. Die Käme S0, S1 und S2 liegen etwa im selben Tiefenbereich wie S4 und S5.

6.2 Theoretische Überlegungen zur Strömung

Die Überströmung eines Sandwellenfeldes wie dem vorliegenden, läßt das Strömungsverhalten des Wasserkörpers nicht unbeeinflusst. Im Folgenden soll erläutert werden, inwieweit aufgrund theoretischer Überlegungen eine Beeinflussung und Änderung des Strömungsfeldes aufgrund der durch die Bodentopographie hervorgerufenen Variationen des Strömungsquerschnittes zu erwarten ist.

6.2.1 Bedeutung der Bodentopographie

Zur Abschätzung der Bedeutung der Topographie für die Strömungsveränderung kann die Bedingung von [Soulsby 1983] genutzt werden. Diese besagt, dass die Strömungsprofile signifikant durch die Bodentopographie gestört werden, wenn

$$\frac{A_S d_M}{\lambda^2} > 2 \cdot 10^{-5}, \quad (6.1)$$

worin:

- A_S : Höhe der Sandwelle [m]
- d_M : mittlere Wassertiefe [m]
- λ : Wellenlänge.

Im Fall der untersuchten Sandwellen vor Sylt wird mit einer mittleren Wassertiefe von 25 m, Wellenlängen von etwa 95...230 m und Sandwellenhöhen von etwa 1.50...11.50 m eine Größenordnung von $> 5.5 \cdot 10^{-3}$ erreicht, eine signifikante Störung der Strömung ist somit gegeben.

6.2.2 Anpassungsschicht

Die Störung des Strömungskörpers durch die Bodentopographie variiert mit der Länge der störungsfreien Zone und der Strömungsgeschwindigkeit. Um die Dicke einer Schicht, in der die Anpassung der Strömung an eine Störung sich abspielt, grob abschätzen zu können, wird die Reibungsgeschwindigkeit mit der Fließzeit stromabwärts der Störung multipliziert (6.2) [van Gastel 1987].

$$S_T = V_R V L_d, \quad (6.2)$$

wobei:

- S_T : Schichtdicke der gestörten Wasserschicht [m]
- V_R : Reibungsgeschwindigkeit (angenommen mit 0.08 m/s)
- V : Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
- L_d : Länge stromabwärts der Störung [m].

Als Störung wird hier die Volumenverkleinerung des Strömungsquerschnittes durch den Anstieg des Bodens aufgrund der Sandwellenausprägung verstanden. Die asymmetrische Form der Sandwellen hat unterschiedliche Längen der für die Störungsausbildung wichtigen Strömungsleehänge bei Ebbe und Flut zur Folge (Tabelle 6.4).

Tab. 6.4: Aufteilung der Wellenlängen der Sandwellen in mittlere Anstiegs- und Abstiegs-längen.

Sandwelle	Länge des Anstiegs [m]	Länge des Abstiegs [m]
S0	69	30
S1	190	38
S2	196	29
S3	191	35
S4	90	24
S5	84	38
S6	75	42

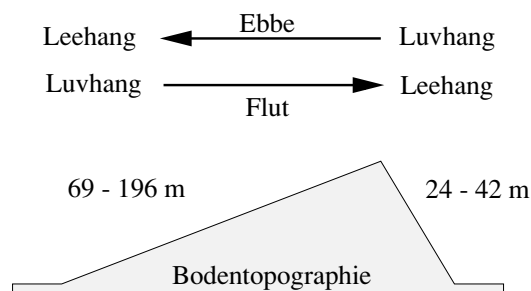


Abb. 6.4: Abbildung der Lage von Luv- und Leehängen bei Ebbe und Flut.

Abbildung 6.4 zeigt, dass bei Ebbe die längere Seite der Sandwelle stromabwärts des Kamms (Lee-seite) liegt und so auf etwa 70. . . 200 m eine Anpassung der Strömung ermöglicht. Wenn zur Berechnung eine Reibungsgeschwindigkeit von 0.08 m/s und eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s angenommen wird, ergibt sich die Schichtdicke, in der die Anpassung stattfinden kann, mit 5.60 . . . 16 m. Bei Flut ist die kurze Seite (30 . . . 45 m) die Leeseite und die Schichtdicke für die Anpassung ergibt sich nur mit 2.4 . . . 3.6 m.

Bei Ebbe gehen die Strömungsgeschwindigkeiten in der Realität nicht wesentlich über die angenommenen 1 m/s hinaus, bei Flut jedoch schon. Die Ausbildung der Anpassungsschicht kann also durchaus auch bei Flut größere als die berechneten Werte annehmen. Die Dicke der Anpassungsschicht bleibt jedoch deutlich unter den bei Ebbe erreichbaren Größenordnungen (bei angenommenen 2 m/s Strömungsgeschwindigkeit ergeben sich Schichtdicken von 4.8 . . . 7.2 m). Die Strömungsgeschwindigkeiten der beiden Tidephasen differieren nicht so wesentlich, dass der Einfluss der unterschiedlich langen Leehänge relativiert wird. Je länger die störungsfreie Zone (Leehang), desto besser kann sich die Strömungsanpassung an die Störung ausbilden und somit auch an der Oberfläche abbilden.

Hinzu kommt, dass bei Ebbe die störungsverursachende Luvseite der Sandwelle die steile Seite ist. Die Strömungstörung durch die Querschnittsverengung bis zum Kamm findet auf einer vergleichsweise kurzen Strecke statt, sodass die Störung größere Auswirkungen als bei Flut. Bei Flut hingegen werden die Sandwellen von ihrer flacheren Seite her überströmt, sodass die Störung durch die der Sandwelle überlagerten Megarippel (entsprechen in ihrer Ausrichtung in etwa denen der Sandwellen) und die Strömungsquerschnittsverengung durch die Sandwelle verursacht wird. Es handelt sich um viele kleine Störungen, die sich im Vergleich zur Ebbphase auf einer längeren Strecke ereignen und daher weniger stark ausgeprägt sind. Die Überströmung des Kamms ist in dieser Folge von Störungen lediglich eine weitere, sodass sie sich aufgrund des allgemein unruhigen Strömungsbildes nicht so deutlich herausbilden kann, wie in den Ebbprofilen. Ausserdem gleichen die größeren Strömungsgeschwindigkeiten bei Flut den Nachteil der kurzen Leehänge nicht aus.

6.2.3 Kontinuitätsgleichung

Die Kontinuitätsgleichung (auch Massenerhaltungsgesetz genannt) besagt, dass die Masse eines Körpers in einem geschlossenen System konstant ist [Dietrich u.a. 1992; Damm 2001; Pfeilsticker 2002]. Das bedeutet, dass sich die Masse $M = \int \rho \vec{v} d\vec{f}$ nur durch Massenzu- oder -abfluss ändern kann, wenn weder Masse erzeugt noch vernichtet wird. Als Konsequenz ergibt sich, dass die zeitliche Änderung der Masse eines Volumens 0 ist.

$$\frac{d}{dt} \int \rho dV = 0 \quad (6.3)$$

Es gilt die Konvention, dass die Massenstromdichte $\rho \vec{v}$ positiv ist, wenn der Massenfluss aus dem Volumen heraus tritt. Bei einer Volumenänderung entspricht der Massenfluss aus oder in das Volumen der zeitlichen Änderung des Volumens (6.4). Bei einem Massenaustritt verringert sich die Masse mit der Zeit.

$$\int \rho \vec{v} d\vec{f} = -\frac{d}{dt} \int \rho dV \quad (6.4)$$

Nach Umformung ergibt sich

$$\int \left[\frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla(\rho \vec{v}) \right] dV = 0. \quad (6.5)$$

Da das Volumen beliebig ist, lautet die vollständige Form der Massenerhaltung von Medien:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \rho \nabla \vec{v} + \vec{v} \nabla \rho = 0. \quad (6.6)$$

Für auf den betrachteten Skalen inkompressible Medien sind die zeitlichen und räumlichen Änderungen der Dichte vergleichsweise klein ($\nabla\rho \approx 0$ und $\frac{\partial\rho}{\partial t} \approx 0$). In diesem Fall reduziert sich die Kontinuitätsgleichung zu:

$$\nabla\vec{v} = 0. \quad (6.7)$$

Das Geschwindigkeitsfeld ist somit divergenzfrei.

Dies bedeutet, dass Volumenänderungen, welche z.B. durch die Verkleinerung des Strömungsquerschnittes durch die Sandwellen hervorgerufen werden, eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit über den Kämmen der Sandwellen zur Folge haben müssen, damit die Kontinuitätsgleichung erfüllt wird.

6.2.4 Konvergenz und Divergenz

Im allgemeinen werden unter Konvergenz- und Divergenzonen Bereiche verstanden, an denen zwei Strömungen zusammen- bzw. auseinanderfließen und aus Kontinuitätsgründen unter sich Vertikalzirkulationen verursachen (Abbildung 6.5). Konvergenz führt zu einer Abwärts-, Divergenz zu einer Aufwärtsbewegung.

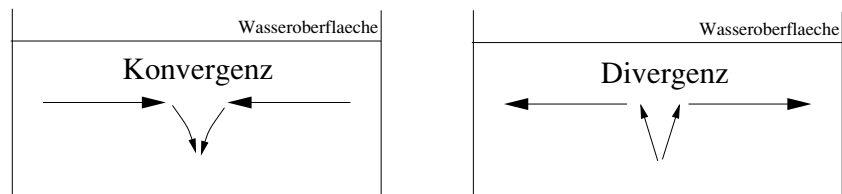


Abb. 6.5: Definition von Konvergenz und Divergenz bei fluiden Medien.

Auf den speziellen Fall der Strömung über Sandwellen kann diese Definition übertragen werden. Die Verkleinerung des Strömungsquerschnittes durch die Sandwelle hat eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit zur Folge, die Vergrößerung des Querschnittes nach dem Überströmen des Kamms verursacht eine Geschwindigkeitsreduzierung (Abbildung 6.6). In Zusammenhang mit der Entstehung dieser Konvergenz- und Divergenzonen wird auch in diesem Fall das Auftreten von Vertikalströmungen vermutet: einer Aufwärtsbewegung bei Divergenz und einer Abwärtsbewegung in Konvergenzonen.

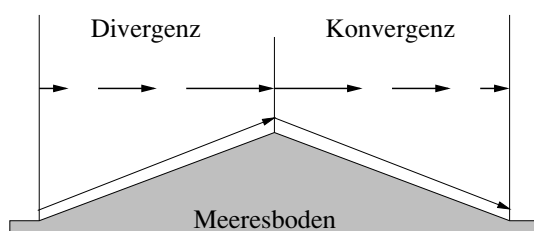


Abb. 6.6: Definition von Konvergenz- und Divergenzonen der Strömung über Sandwellen.

Die Auswirkung die Konvergenz- und Divergenzonen bei Ebbe und Flut auf die Wasseroberfläche haben, kann schematisch dargestellt werden (Abbildung 6.7).

Konvergenzonen zeigen sich an der Wasseroberfläche durch eine erhöhte Rauigkeit und treten im Fall der Sandwellen im Strömungslee der Kämmen auf. Die Abbildung von Divergenzonen sollte sich anhand ihrer verminderten Oberflächenrauigkeit im Strömungsluv herausbilden. Die langen Leehänge bei Ebbe ermöglichen einen breiten Bereich erhöhter Oberflächenrauigkeit, sodass die Erkennbarkeit von Konvergenz- und Divergenzonen bei Ebbe besser ist als bei Flut.

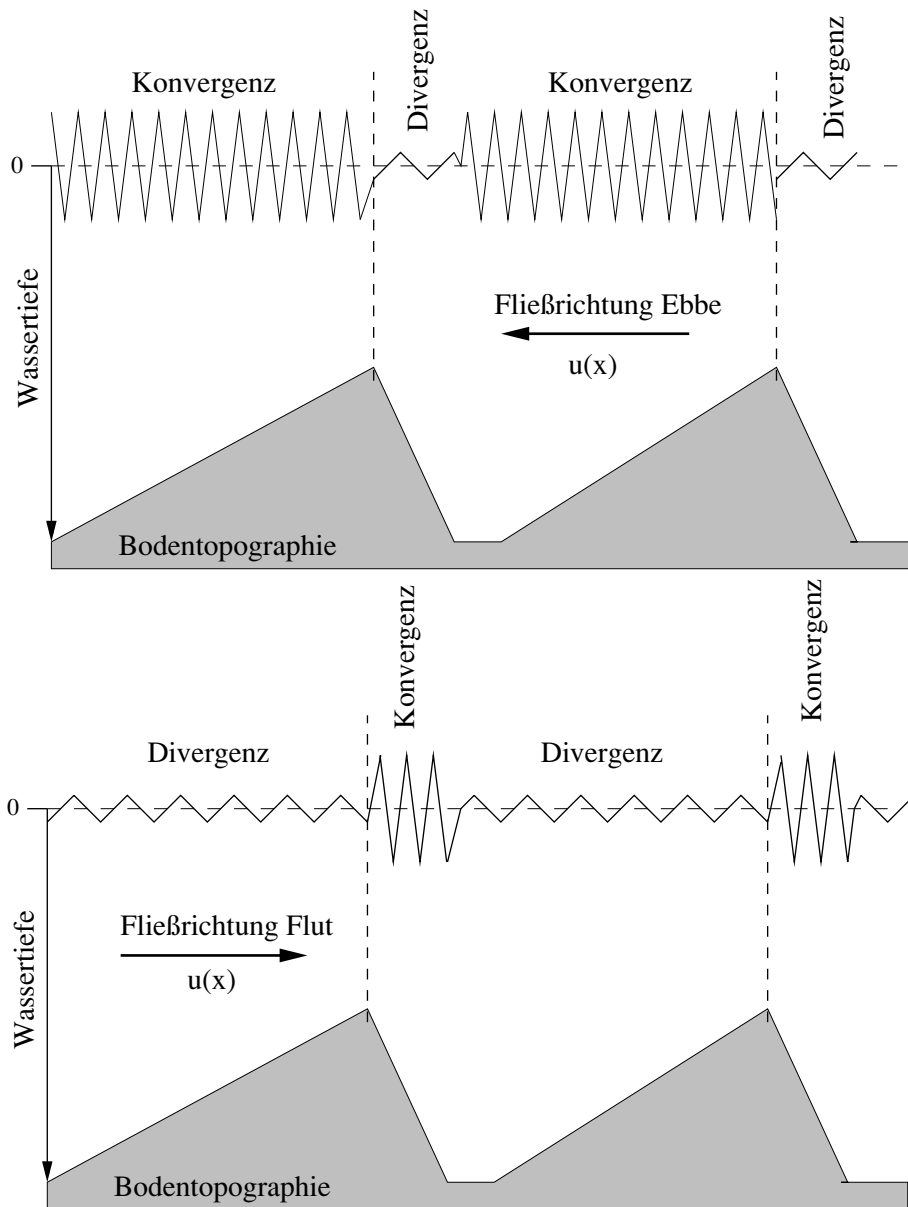


Abb. 6.7: Schema der Wechselwirkung zwischen asymmetrischen Sandwellen des Meeresbodens und der Änderung der Rauigkeit der Wasseroberfläche bei Ebbe und Flut, in Anlehnung an [Alpers und Hennings 1984].

6.3 Analyse der Messergebnisse

6.3.1 Allgemeines zu den Strömungsabbildungen

Die Bewegung von Flüssigkeiten kann anhand zweier unterschiedlicher Darstellungen untersucht werden. Man unterscheidet zwischen der Lagrangeschen und der Eulerschen Darstellung. Die Lagrangesche Darstellungsweise betrachtet die Flüssigkeitsbewegung aus der Sicht einzelner Flüssigkeitsteilchen und beschreibt ihre Bahnen sowie die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, die sie dabei besitzen. Sie findet vor allem bei Diffusions- und Transportprozessen ihre Anwendung. Im Rahmen dieser Arbeit interessiert jedoch der Strömungszustand und die Geschwindigkeitsverteilung an festen Orten als Funktion der Zeit. Dafür ist die Eulersche Darstellungsweise besser geeignet. Diese schaut von außerhalb auf die Flüssigkeit und beobachtet das Verhalten der Strömung an einem bestimmten Ort.

Um die Analyse der Messergebnisse in Bezug auf die theoretischen Überlegungen (Abschnitt 6.2) durchführen zu können, werden die Isolinienabbildungen der Strömungsprofile herangezogen, welche Eulersche Darstellungen des Strömungsfeldes sind. Für jede Tidephase werden nur die Ergebnisse von gegen die Strömung gefahrenen Profile zur näheren Betrachtung verwendet. Diese haben aufgrund der höheren Datendichte eine bessere Auflösung des Strömungsfeldes und bieten etwa für alle 10 m ein Vertikalprofil. In der Ebbphase werden aufgrund der günstigeren Gegebenheiten durch Anströmung des steilen Hanges mit steigenden Strömungsgeschwindigkeiten die besten Darstellungen erhalten. In der Flutphase sind möglichst geringe Geschwindigkeiten von Vorteil, um Grafiken mit klaren Aussagen zu erhalten.

In der Analyse werden daher sowohl ein Ebbprofil mit einem mittleren Strömungsbetrag von 94 cm/s als auch zwei Flutprofile mit den mittleren Strömungsgeschwindigkeiten 78 m/s und 108 cm/s betrachtet. Die zwei Flutprofile sollen die Entwicklung mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit abbilden. Das Ebbprofil entstammt dem Zeitbereich der schnellen Ebbströmung, die Flutprofile gehören den Flutphasen mit langsameren Strömungsgeschwindigkeiten an. Zur Unterscheidung der beiden Flutprofile werden diese mit früher Flutphase (etwa 70 Minuten nach Stauwasser) und späterer Flutphase (etwa 100 Minuten nach Stauwasser) bezeichnet. Die Standardabweichung der Fehlergeschwindigkeit im Ebbprofil liegt bei 9.35 cm/s und in den Flutprofilen bei 8.75 cm/s bzw. 10.72 cm/s. Dies bedeutet, dass die Homogenität der Strömung in den Tiefenzellen akzeptabel ist und diese Daten benutzt werden können.

Die Standardabweichungen (1σ) für die Rechts- und Hochwerte der Profile liegen bei 2.62 m bzw. 0.90 m für Ebbe und 2.87 m und 2.06 m bzw. 0.99 m und 0.81 m bei Flut. Die Isolinienplots, die die Darstellung des Strömungsbetrages übernehmen, werden nicht besprochen, da ihre Aussagen in den Plots der Einzelkomponenten enthalten sind.

Jede der Isoliniendarstellungen ist am rechten Rand mit der zugehörigen Farbskala versehen, die die Farbgebung der Geschwindigkeitsstufen darstellt. In der Überschrift ist die jeweilige Tidephase, sowie der Kurs durchs Wasser (KdW) und die durchschnittliche Fahrt über Grund (FüG) enthalten. Ein aus 25 cm großen Tiefenzellen bestehendes Vertikalprofil reicht von 2.32 m Tiefe bis etwa 1 m über dem Gewässerboden. Die Daten nahe dem Boden können aufgrund möglicher Interferenzen mit dem Bodensignal nur unter Vorbehalt betrachtet werden.

Die schwarz gefüllte Sandwellendarstellung gibt die durch das ADCP gemessene Wassertiefe wieder. Die helle Linie stellt die Tiefen der Echolotung dar. Unterschiede in den Tiefen kommen durch die unterschiedliche Positionierung der beiden Messgeräte an Bord der „Ludwig Prandtl“ und durch die verschiedenen verwendeten Messfrequenzen (und somit einem unterschiedlichen Footprint) zu stande.

Tab. 6.5: Zusammenstellung der mittleren Strömungsrichtungen und -beträge aller nicht grob fehlerhaften Profile.

EBBE			FLUT		
	Richtung [°]	Betrag [cm/s]		Richtung [°]	Betrag [cm/s]
004	279	91	017	102	78
005	276	96	018	103	90
006	278	96	019	100	108
007	275	100	022	101	124
009	274	94	024	101	130
011	273	88	026	101	131
013	270	77			

Die Drehung des Koordinatensystems zur Berechnung und Darstellung der Strömungskomponenten senkrecht und parallel zu den Sandwellenkämmen ergibt beim Vergleich der Darstellungen der verschiedenen Winkel, dass maximale mittlere Strömungskomponenten senkrecht zu den Sandwellenkämmen bei etwa 80° Drehung erreicht werden. Im Folgenden werden daher nur die Abbildungen für die x - und y -Komponente bei einer Drehung von 80° betrachtet. Zur leichteren Vorstellung werden diese Komponenten nun als parallel (vorher x -Komponente) und senkrecht (vorher y -Komponente) zu den Sandwellenkämmen bezeichnet (Abbildung 6.8).

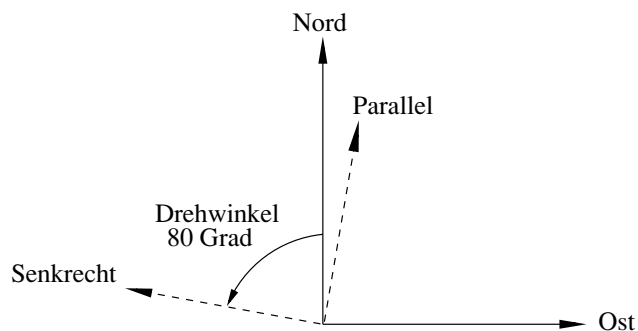


Abb. 6.8: Bezeichnung der Komponenten nach der Drehung um 80° gegen den Uhrzeigersinn.

Zwischen dem östlichsten und dem westlichsten Punkt des ADCP-Profiles besteht ein Unterschied in der Tidephase, da diese nicht zum gleichen Zeitpunkt gemessen wurden und die Tidewelle sich bei Ebbe zuerst in den östlichen, bei Flut in den westlichen Bereichen auswirkt. Die Beeinflussung der Strömungskomponenten durch diese Tideunterschiede kann nicht ausgeschlossen werden.

6.3.2 Richtungskomponente

Die Isoliniengrafiken der Strömungsrichtung Θ (Abbildung 6.9, 6.10 und 6.11) zeigen die Richtungsänderung in Abhängigkeit von der Position. Die mittlere Strömungsrichtung des Ebbprofils beträgt 274° , die des frühen Flutprofils 102° und die des späteren Flutprofils 100° . Die Strömungsrichtung ändert sich mit der Strömung schauend bei Ebbe und Flut etwa 30° gegen den Uhrzeigersinn. Sie findet jeweils nach dem Passieren der Sandwellen in deren Leehang statt. Diese Messungen bestätigen die Aussage von [Hennings u.a. 2000], nach der sich die Strömungsrichtung nach dem Passieren von Sandwellen um bis zu 33° entgegen dem Uhrzeigersinn ändern kann.

Die beiden Darstellungen der Flutphase zeigen, dass sich die Richtungsänderungen bei Profilen mit höherer Strömungsgeschwindigkeit (Abbildung 6.11) zunehmen und sich weiter bis zur Wasseroberfläche ausdehnen. Gleichzeitig ist der Einfluss unterschiedlicher Tidephasen zwischen Ost- und Westende des Profils nicht mehr zu erkennen. In Profilen geringerer Strömungsgeschwindigkeit wie im Ebb- oder frühen Flutprofil ist dies noch deutlich (vgl. Abbildung 6.9 und 6.10 mit Abbildung 6.11).

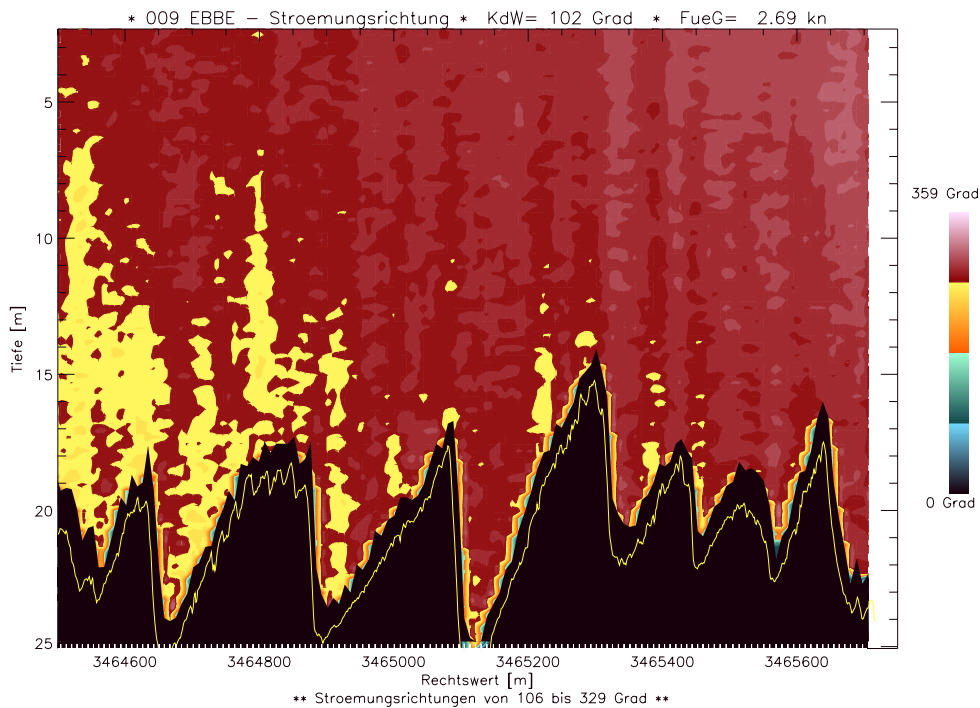


Abb. 6.9: Strömungsrichtung Θ in der Ebbphase.

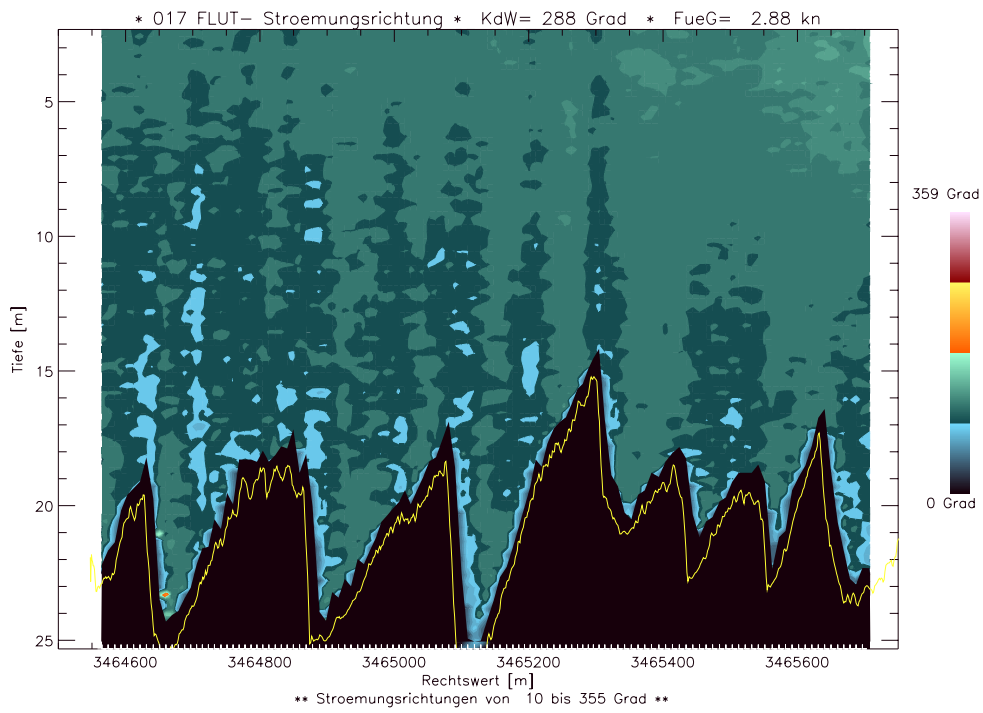


Abb. 6.10: Strömungsrichtung Θ in der frühen Flutphase.

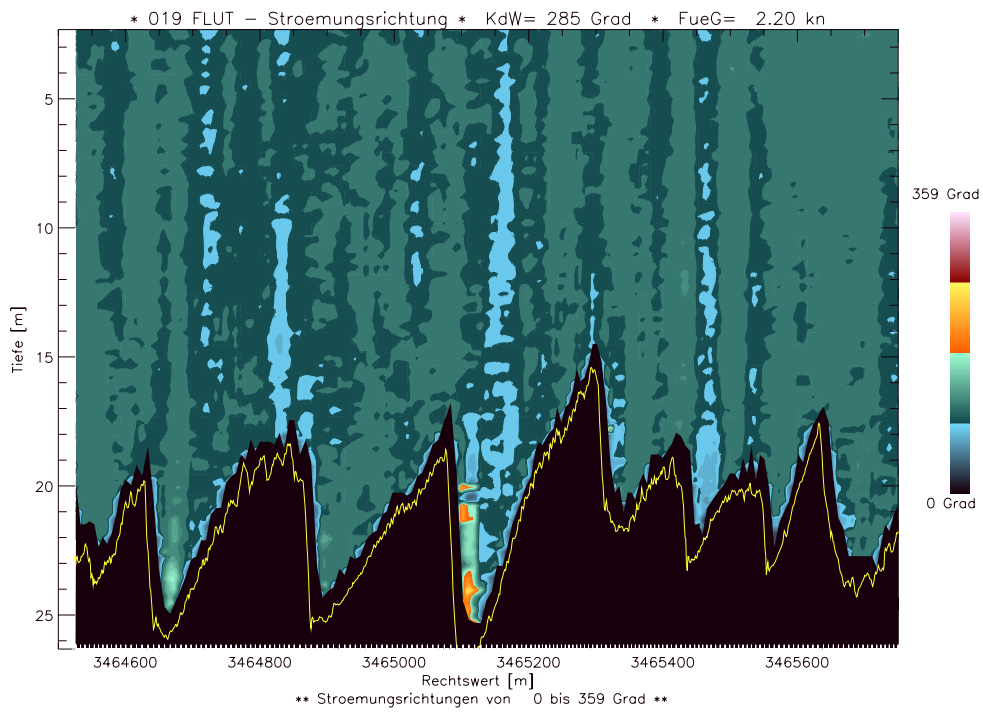


Abb. 6.11: Strömungsrichtung Θ in der späteren Flutphase.

6.3.3 Parallelkomponente

Die Strömungsgeschwindigkeiten des Ebbprofils der Parallelkomponente variieren um den Nullpunkt und betragen im Mittel -1 cm/s (Abbildung 6.12). Die Drehung der Strömung nach dem Passieren der Sandwellen verursacht eine Umkehrung der Strömungsgeschwindigkeit vom positiven in den negativen Bereich. In den Abbildungen des Ebbprofils (Abbildung 6.12) und der frühen Flutphase (Abbildung 6.13) wird der unterschiedliche Fortschritt der Tidewelle zwischen Ost- und Westende des Profils deutlich. Trotz der Auswirkungen der überlagernden Tidewelle ist die Ausbildung einer Strömungsänderung dieser Komponenten im Bereich der Leehänge erkennbar.

Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten wie sie beispielsweise in der späteren Flutphase auftreten (vgl. Abbildung 6.14) sind Unterschiede der Tidewelle zwischen den beiden Profilenden nicht mehr erkennbar. Im Gegensatz zu den Profilen mit geringeren Fließgeschwindigkeiten erfassen die Strömungsänderungen in der späteren Flutphase nach jeder Sandwelle die gesamte Wassersäule. Zu einer Vorzeichenumkehrung kommt es nach dem Passieren jeder einzelnen Sandwelle.

Die mittlere parallele Strömungsgeschwindigkeit ist auch bei den Flutprofilen gering und variiert im Vorzeichen (Abbildung 6.13 und 6.14). Die Existenz der parallelen Strömungskomponenten von bis zu 40 cm/s deutet auf die wellenförmige Ausprägung des Kammverlaufs der Sandwellen. Bei einem geraden Verlauf wäre die parallele Komponente bei der Überströmung nahezu konstant.

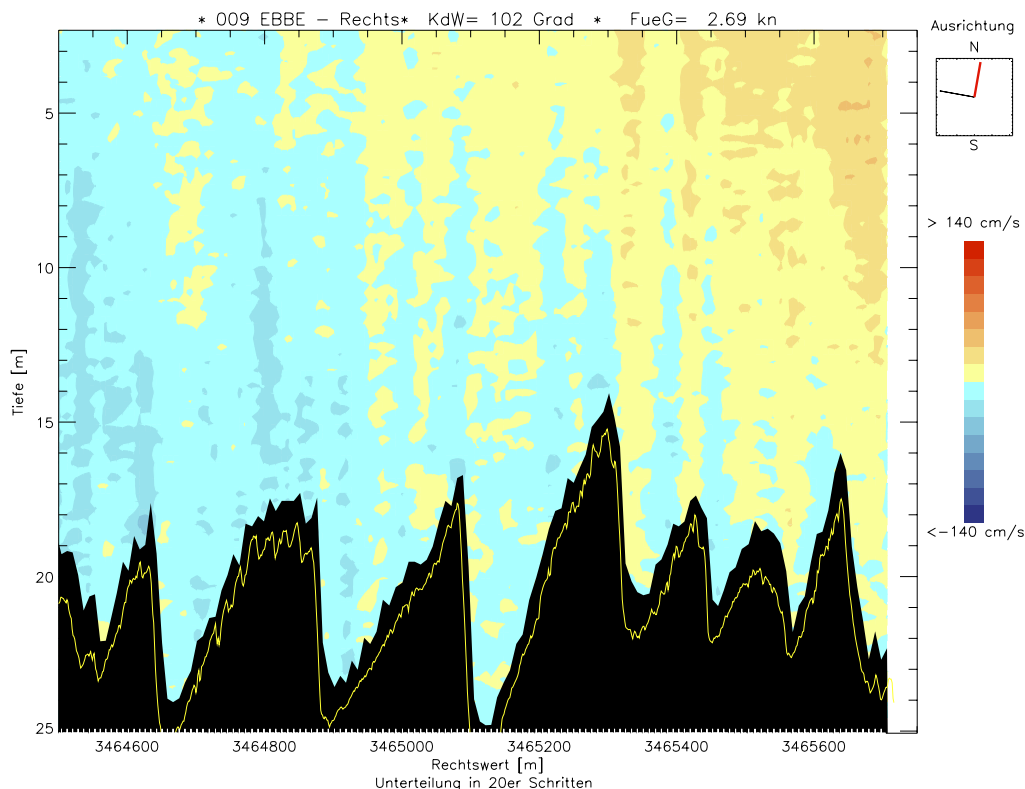


Abb. 6.12: Parallelkomponente u_{para} bei Ebbe.

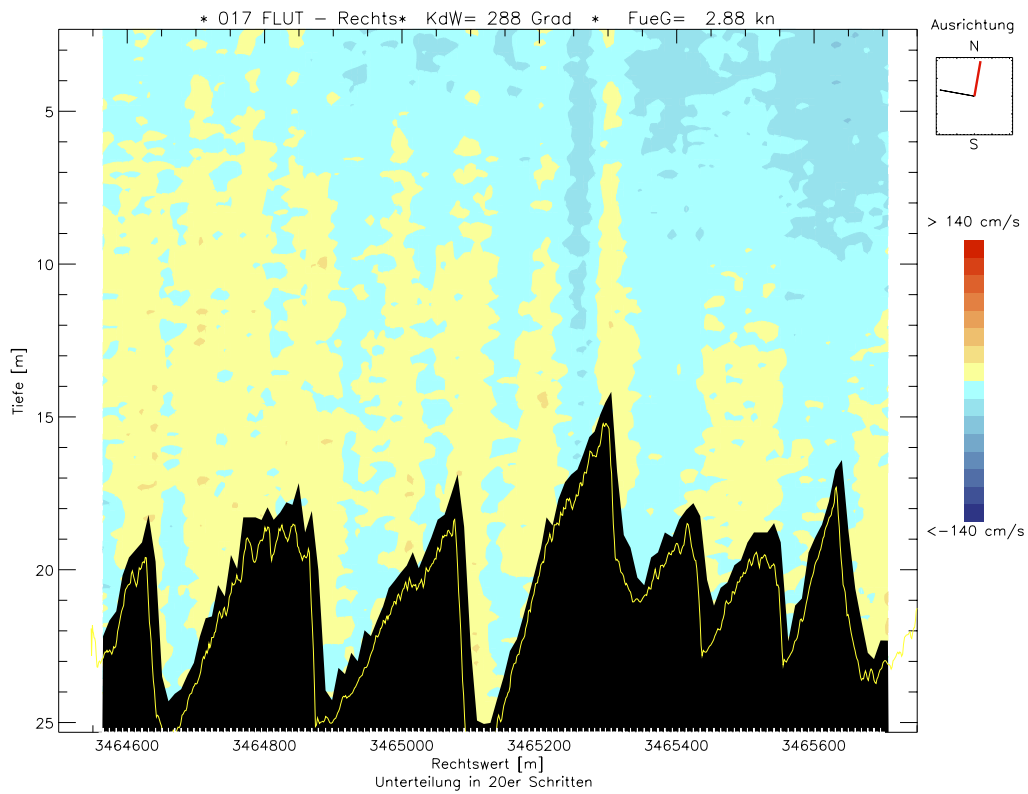


Abb. 6.13: Parallelkomponente u_{para} in der frühen Flutphase.

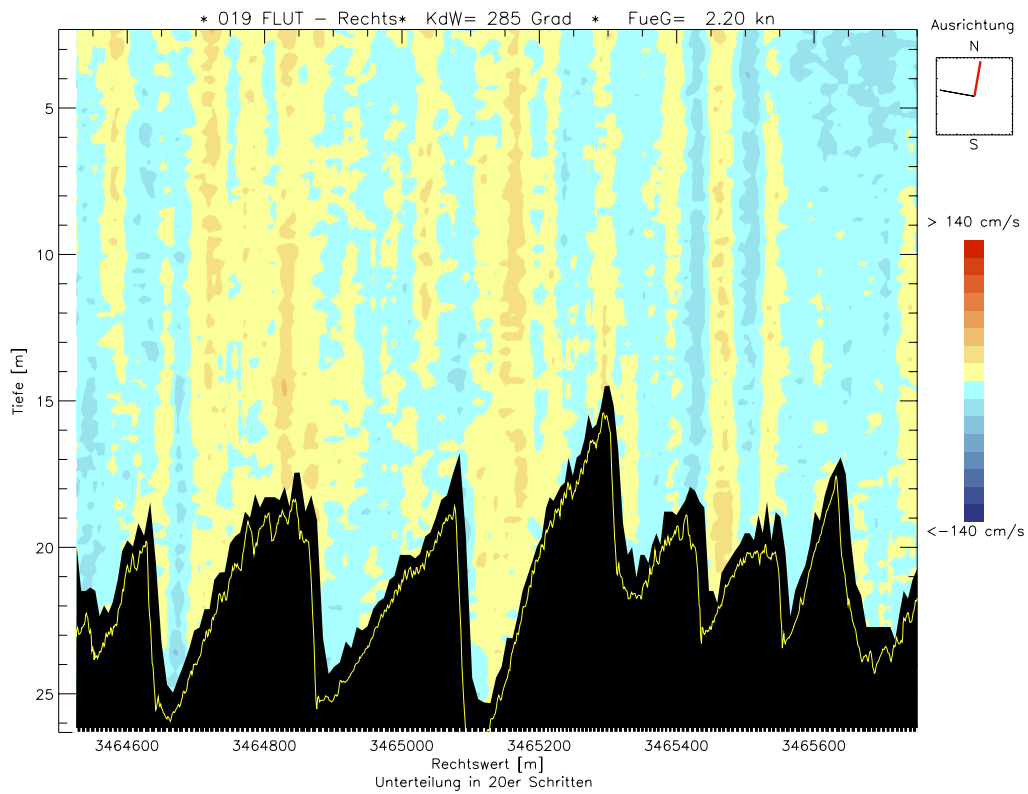


Abb. 6.14: Parallelkomponente u_{para} in der späteren Flutphase.

6.3.4 Senkrechte Komponente

Die senkrechte Komponente repräsentiert die Strömungsrichtung mit den größten Strömungsgeschwindigkeiten. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in dieser Richtung beträgt bei Ebbe etwa 96 cm/s. Die maximalen Geschwindigkeiten werden jeweils über den Kämmen erreicht, die minimalen über den Senken der Sandwelle. Es ist zu erkennen, dass annähernd alle Sandwellen bei Ebbe (Abbildung 6.15) signifikante Strömungsänderungen von bis zu 40 cm/s hervorrufen, die sich nahezu ohne Versatz bis in die obersten erfaßten Schichten fortsetzen. Ein Einfluss der voranschreitenden Tidewelle, wie bei der parallelen Komponente der Ebbphase der Fall, kann der Isoliniengrafik der senkrechten Komponente nicht entnommen werden.

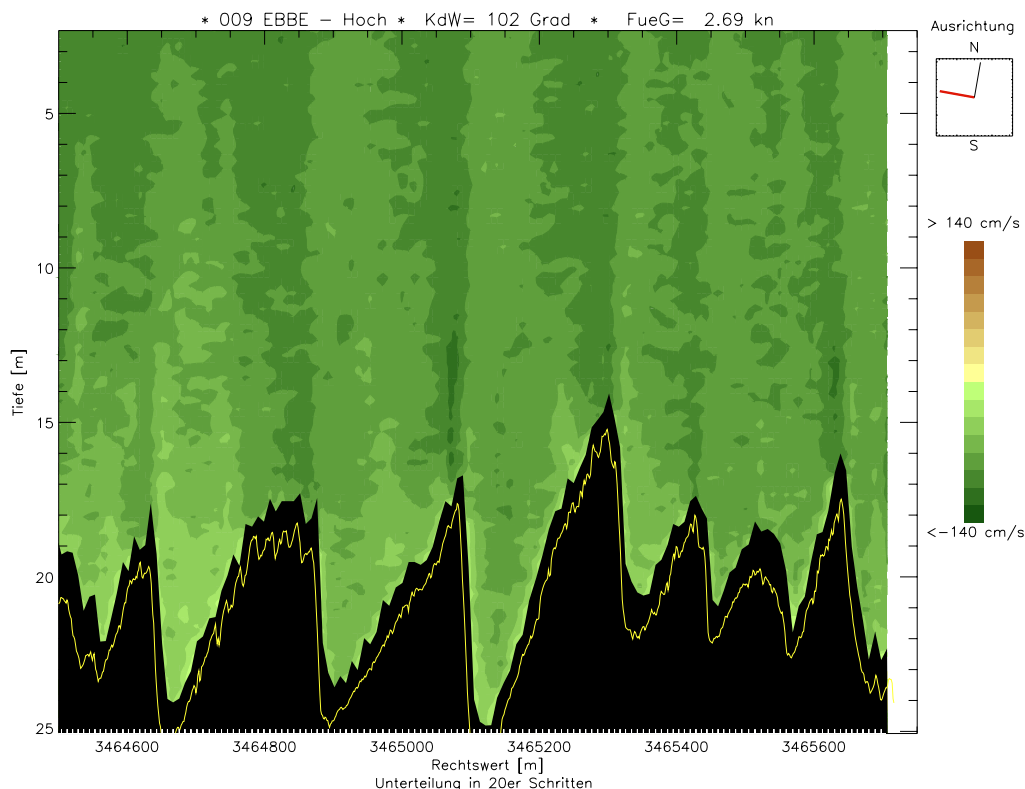


Abb. 6.15: Senkrechte Komponente u_{senk} bei Ebbe.

Bei Flut (Abbildung 6.16 und 6.17) ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit der senkrechten Komponente 78 cm/s und 108 cm/s. Auch hier wird über den Sandwellenkämmen eine Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit um bis zu 40 cm/s erreicht. Bei den geringen Geschwindigkeiten des frühen Flutprofils (vgl. Abbildung 6.16) gleichen die Ergebnisse denen der Ebbphase. Mit steigender Geschwindigkeit jedoch werden die maximalen Geschwindigkeiten in den oberen Wasserschichten durch Einlaufen der Tidewelle erreicht (ähnlich der parallelen Komponente der Ebbphase), nicht durch die Steigerung der Strömungsgeschwindigkeiten infolge der Sandwellenform. Die Strömungsänderungen durch die Sandwellen werden überdeckt und so eine klare Trennung zwischen schnellerer Strömung über den Kämmen und langsamerer über den Senken verhindert.

Der allgemeine Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten über den Kämmen korrespondiert mit der Theorie der bereits aufgeführten Kontinuitätsgleichung (Abschnitt 6.2.3). Die unterschiedliche Stärke der Strömungssteigerung über den verschiedenen Kämmen ist von der Steigung des Luvhanges und dem Höhenunterschied abhängig, welcher beim Überqueren jedes Kamms überwunden wird. Infolgedessen weist der Kamm der Sandwelle S2 mit der größten Steigung des Luvhanges von etwa 30 % und einem

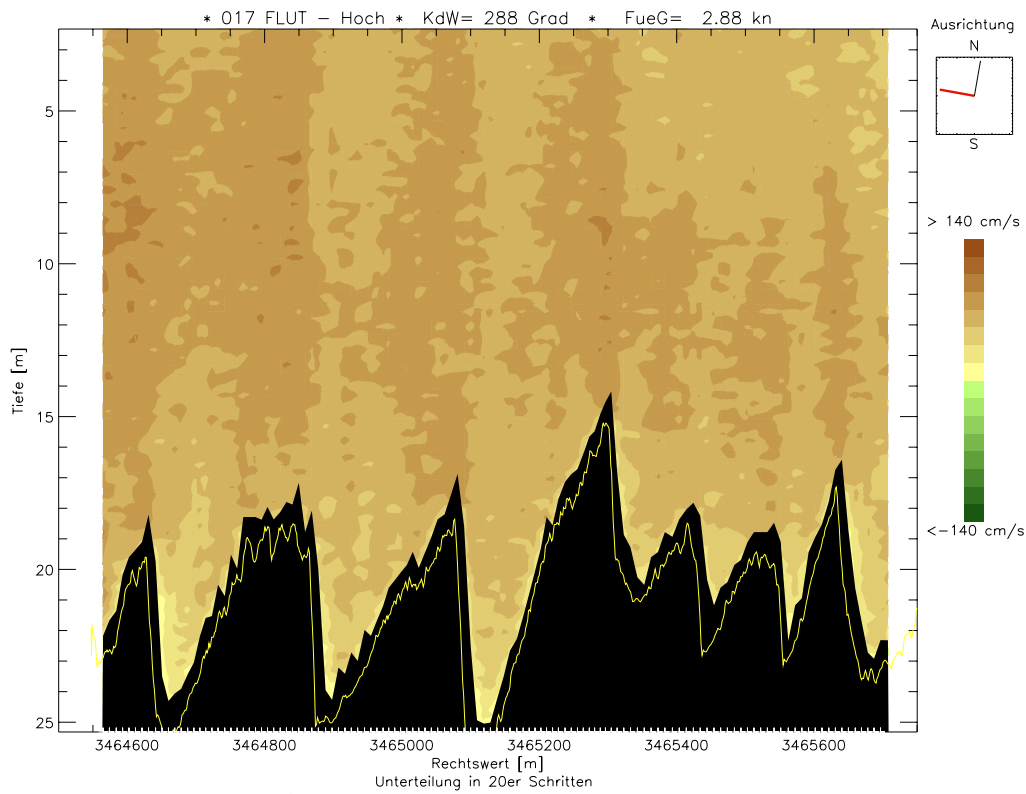


Abb. 6.16: Senkrechte Komponente u_{senk} in der frühen Flutphase.

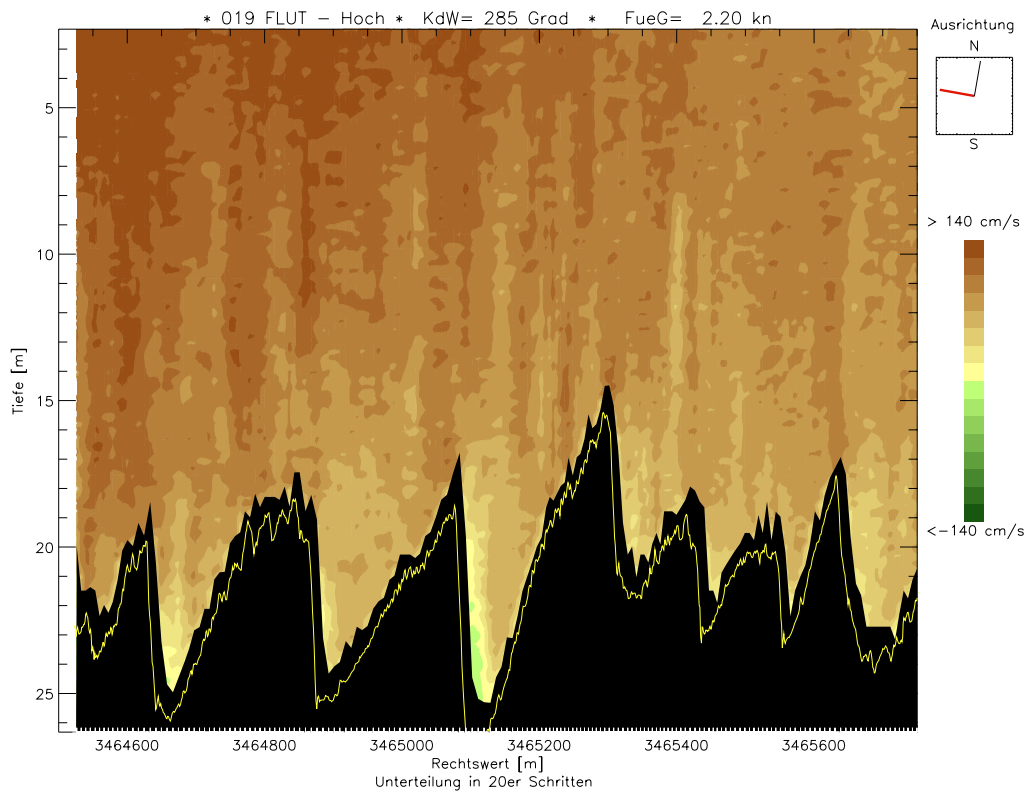


Abb. 6.17: Senkrechte Komponente u_{senk} in der späten Flutphase.

Höhenunterschied zwischen Kamm und vorhergehendem Trog von 8.50 m die größten Geschwindigkeitssteigerungen auf. Die Sandwellen S1, S3 und S6 folgen mit 7 m Höhenunterschied und Steigungen von 16 ... 20 %.

Die Geschwindigkeitssteigerung über S0 ist trotz einer Steigung von 21 % geringer, da der Höhenunterschied nur etwa 6.5 m beträgt. Hinzu kommt, dass nicht jede Sandwelle alleine durch Steigung und Höhenunterschied charakterisiert werden kann. Bei engstehenden Gruppen wie z.B. S3, S4, S5 und S6 muss berücksichtigt werden, dass tiefere Käme, die von höheren umrahmt werden, weniger Auswirkung haben, als hohe einzeln stehende Käme. Bei S5 muss zusätzlich bedacht werden, dass es sich nicht um eine ausgeprägt asymmetrische Welle handelt und die Abrundung des Kamms eine längere Verengung des Strömungsquerschnittes darstellt als spitze Käme.

6.3.5 Vertikalkomponente

Wie den Isoliniendarstellungen der vertikalen Komponente zu entnehmen ist, sind die oberen vier Meter durch das Schiff stark beeinflusst und werden daher nicht in die Betrachtung mit einbezogen (vgl. Abschnitt 6.4). Die vertikalen Strömungen erstrecken sich im Ebbprofil über einen Strömungsbereich von -10 ... 16 cm/s (Abbildung 6.18). Es ist im Isolinenplot der Ebbphase deutlich erkennbar, dass sich die

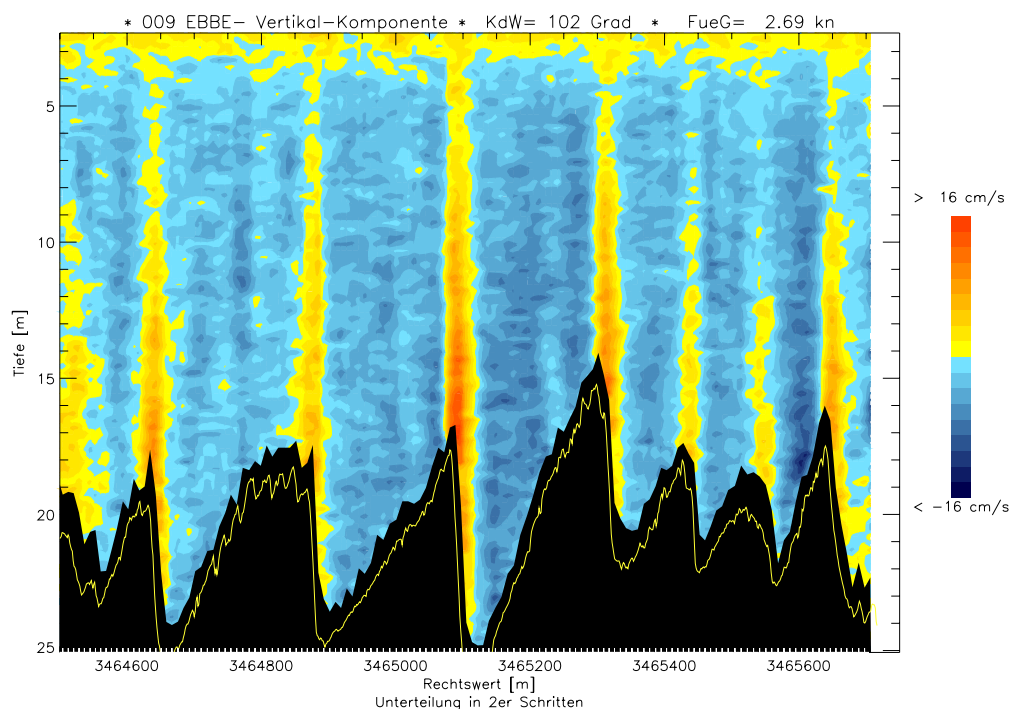


Abb. 6.18: Vertikale Geschwindigkeitskomponente u_{verti} in der Ebbphase.

Auftriebsphänomene, d.h. die aufwärts orientierten vertikalen Strömungen (positiv), über den Steilhängen und Kämen der Sandwellen entwickeln. Abwärts gerichtete Vertikalbewegungen (negativ) treten in den Senken bzw. Flachhängen der Sandwellen auf. Durch die Wellenform des Gewässerbodens kommt es zur Ausbildung einer regulären Struktur von Zirkulationszellen. An der Wasseroberfläche verursachen diese Auftriebsphänomene die Entstehung einer turbulenten Struktur.

In den beiden Flutprofilen (vgl. Abbildungen 6.19 und 6.20) treten die Zirkulationsbereiche weniger deutlich auf als bei Ebbe, sind aber dennoch mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit immer stärker zu erkennen. Die Auftriebsphänomene bilden sich über den Flachhängen aus, erstrecken sich über längere Bereiche und erreichen geringere Geschwindigkeiten als in der Ebbphase. Die Gebiete abwärts gerichteter Vertikalbewegung liegen über den Steilhängen und sind vom Strömungsbetrag her ähnlich stark ausgebildet wie die Aufwärtsbewegung in der Ebbphase.

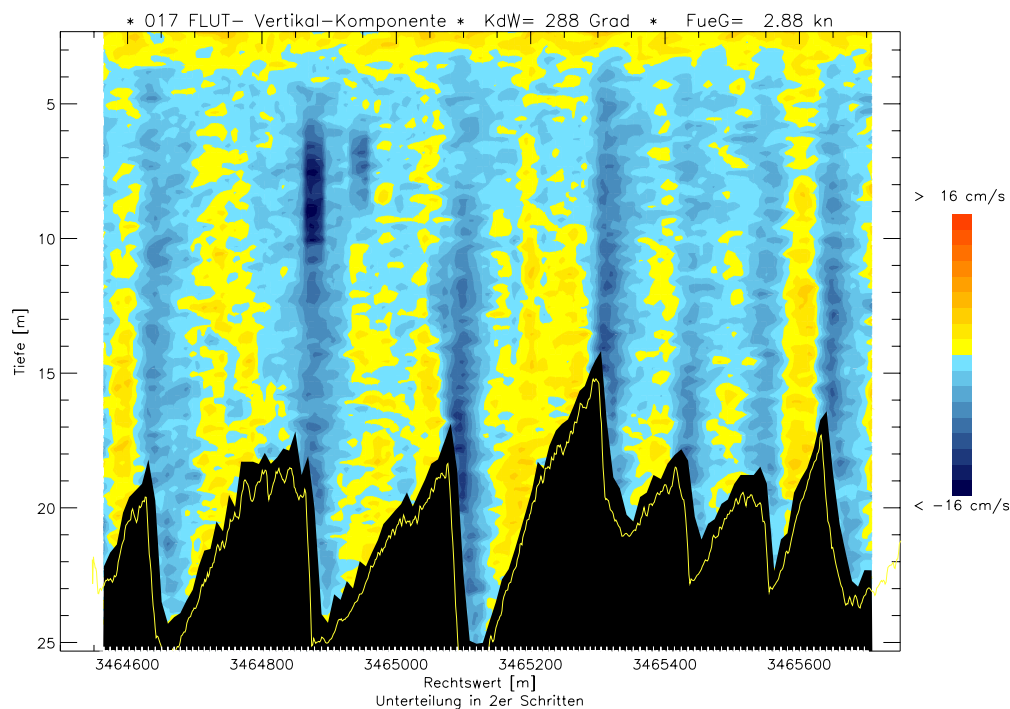


Abb. 6.19: Vertikale Geschwindigkeitskomponente u_{verti} in der frühen Flutphase.

Das Auftreten von klar abgetrennten Bereichen der Auf- bzw. Abwärtsbewegung, die schlauchartig vertikal vom Steilhang der Sandwelle bis in die Nähe der Wasseroberfläche reichen, bestätigt die Theorie von [Alpers und Hennings 1984]. Genaue Aussagen zum Versatz dieser Bereiche gegenüber den Kämmen der Sandwellen können anhand der vorliegenden ADCP-Daten nicht getroffen werden, da die erforderliche Auflösung nicht erreicht wird.

Um diese zu erlangen, wäre ein erheblicher Mehraufwand bei der Durchführung der Messungen nötig. Hierauf wurde verzichtet, da bei der schiffsgestützten ADCP-Messung eine Störung der oberen Wasserschichten nicht vermeidbar ist und die interessierenden Geschwindigkeiten an der Wasseroberfläche auch bei besserer Auflösung der Strömungsdaten nicht bestimmt werden können. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Struktur der unteren Wasserschichten in Richtung der Wasseroberfläche zwar verringert, aber fortsetzt und sich auf die Oberflächenrauigkeit auswirkt (siehe Abschnitt 6.4).

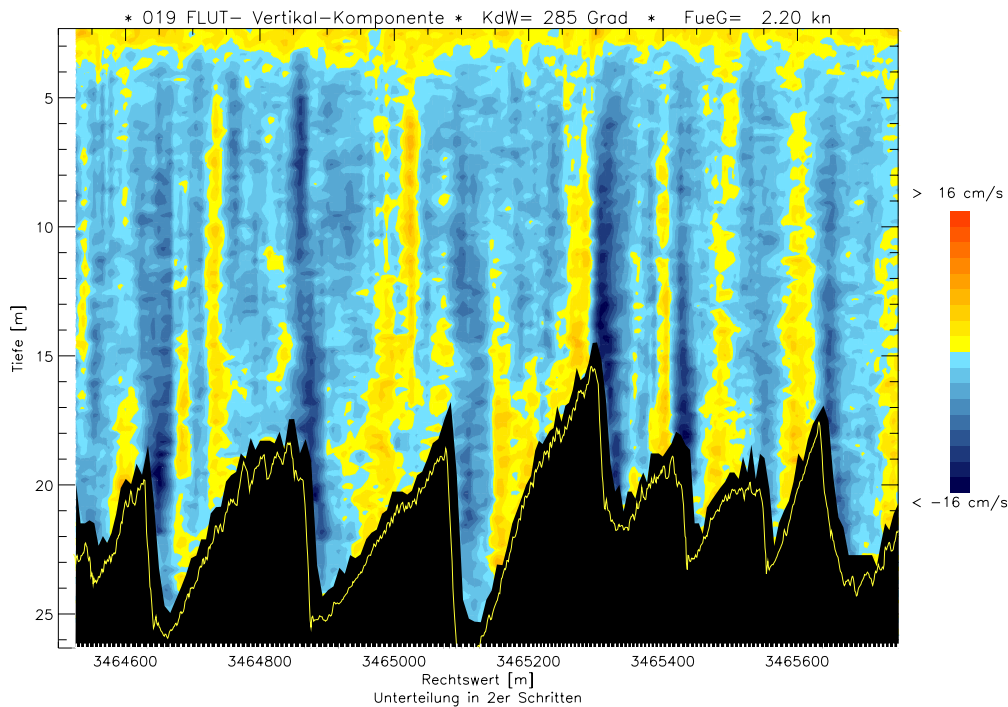


Abb. 6.20: Vertikale Geschwindigkeitskomponente u_{verti} in der späteren Flutphase.

6.3.6 Gradienten

Für die Abbildung von Oberflächensignaturen ist die Grundstruktur der Strömung nicht von Bedeutung. Vielmehr kommt es auf Änderungen (Gradienten) derselben an, wie sie z.B. beim Aufeinandertreffen von Aufwärts- und Abwärtsbewegung bzw. an Divergenz- und Konvergenzzonen entstehen. Die Ergebnisse der Gradientenberechnung werden in Isoliniengrafiken für jede Komponente dargestellt, wobei Konvergenzzonen mit negativem und Divergenzzonen mit positivem Vorzeichen abgebildet werden.

In den Gradientendarstellungen der senkrechten Komponente zeigt sich die typische Verteilung von divergenten und konvergenten Fließstrukturen, die mit asymmetrischen Sandwellen einhergehen (Abbildungen 6.21, 6.22 und 6.23). In der Ebbphase bilden sich über den Steilhängen der Sandwellen Divergenz- und über den Flachhängen Konvergenzzonen. Bei Flut ist das Gegenteil der Fall: Divergenz besteht über den Flachhängen, Konvergenz über den Steilhängen.

Die Beträge der Gradienten in den Konvergenz- und Divergenzzonen differieren bei Ebbe und Flut. Der Abbildung 6.21 der Ebbphase ist zu entnehmen, dass die Gradienten der senkrechten Komponente in Divergenzzonen (positives Vorzeichen des Gradienten) Größen von bis zu 0.015/s erreichen, wohingegen die Gradienten der Konvergenzzonen (negatives Vorzeichen) deutlich darunter bleiben (etwa 0.010/s). In der Flutphase (vgl. Abbildungen 6.22 und 6.23) sind diese weniger unterschiedlich als bei Ebbe.

In den Gradientendarstellungen der parallelen Komponente (Abbildungen 6.24, 6.25 und 6.26) treten ähnlich der senkrechten Komponente Konvergenz- und Divergenzstrukturen auf, d.h. die parallele Komponente kann nicht als konstant angenommen werden. In der späteren Flutphase treten in dieser Komponente sogar deutlichere Gradienten auf, als in der senkrechten Komponente.

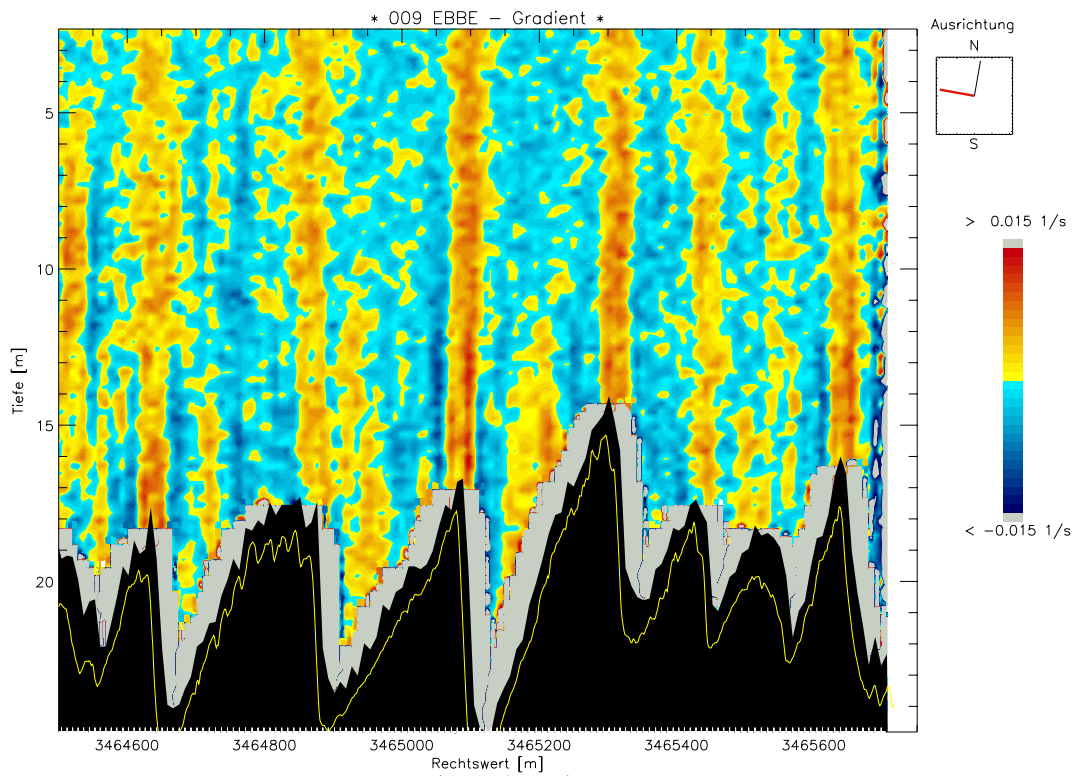


Abb. 6.21: $\partial u_{senk} / \partial \text{Rechtswert}$ bei Ebbe.

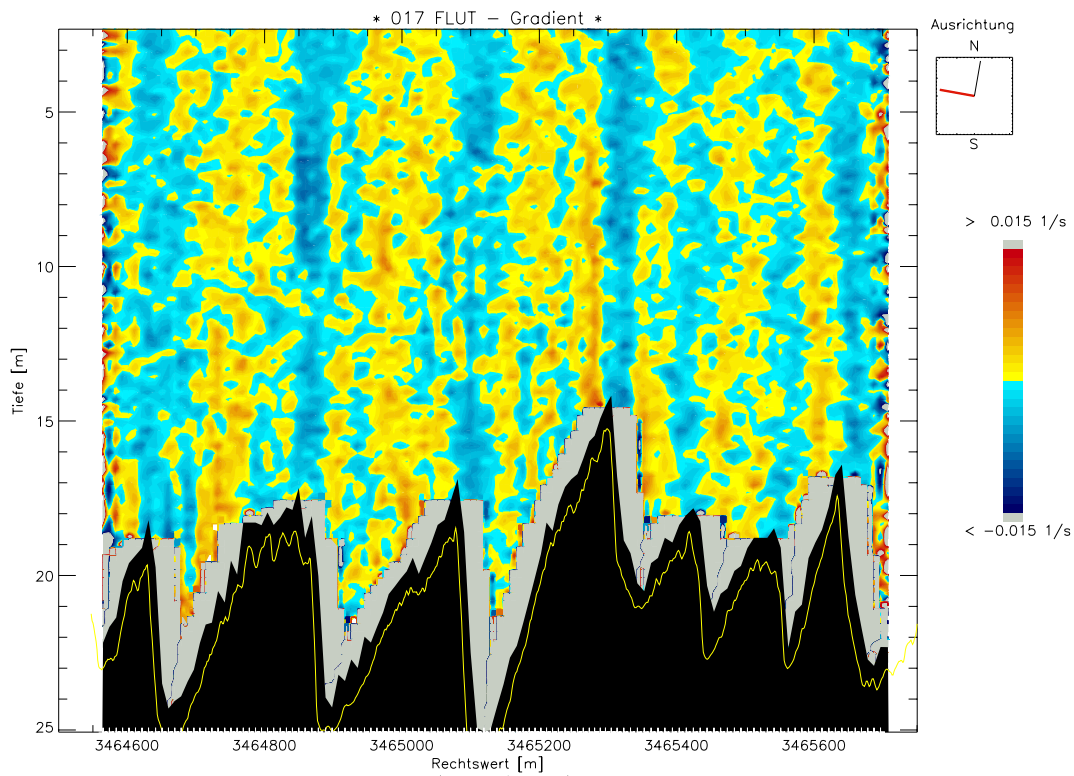


Abb. 6.22: $\partial u_{senk} / \partial \text{Rechtswert}$ in der frühen Flutphase.

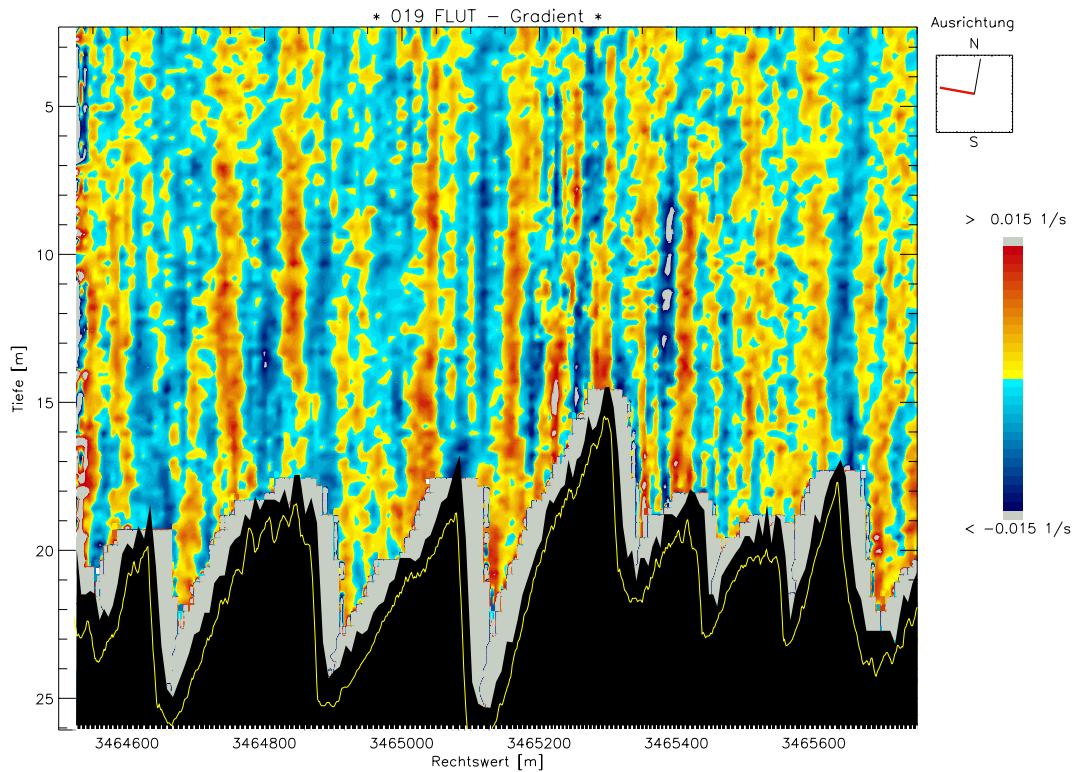


Abb. 6.23: $\partial u_{senk} / \partial \text{Rechtswert}$ in der späteren Flutphase.

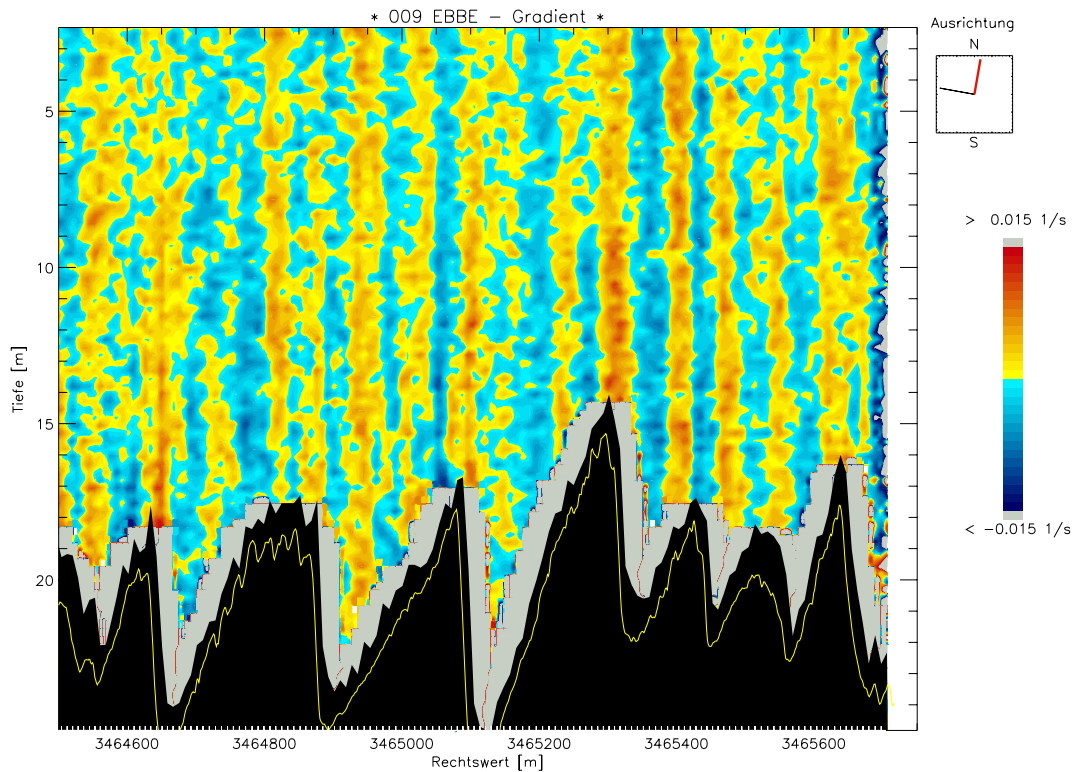


Abb. 6.24: $\partial u_{para} / \partial \text{Rechtswert}$ bei Ebbe.

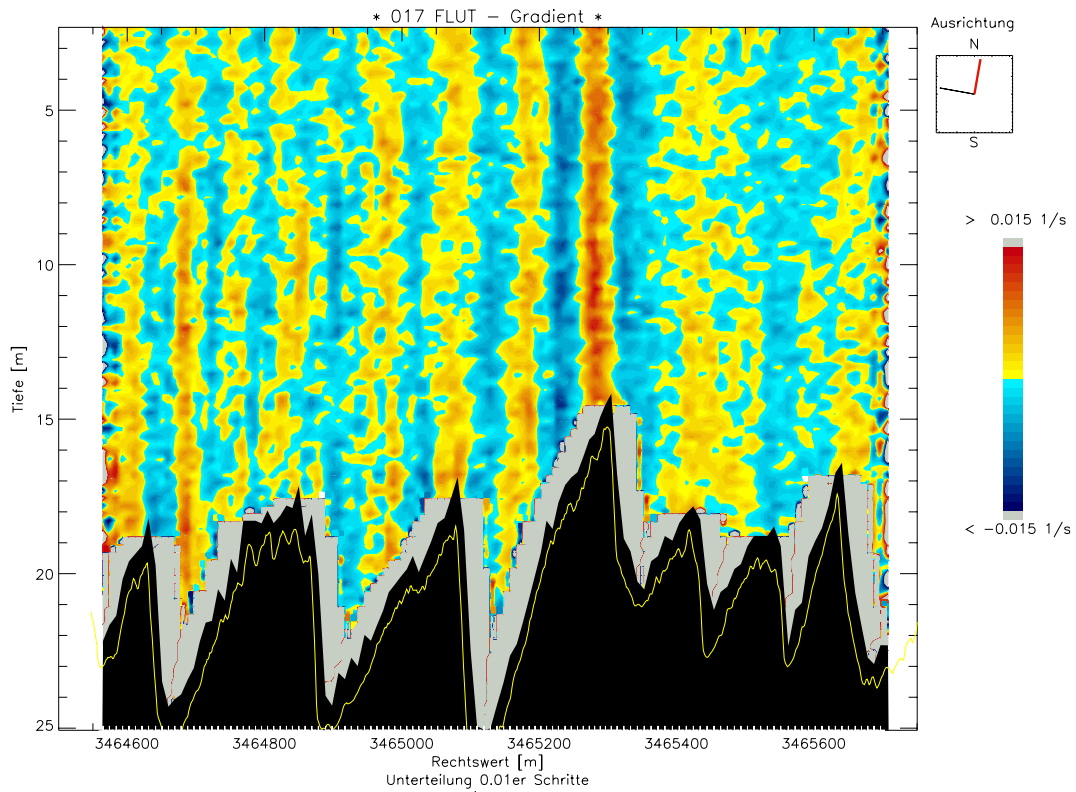


Abb. 6.25: $\partial u_{para} / \partial \text{Rechtswert}$ in der frühen Flutphase.

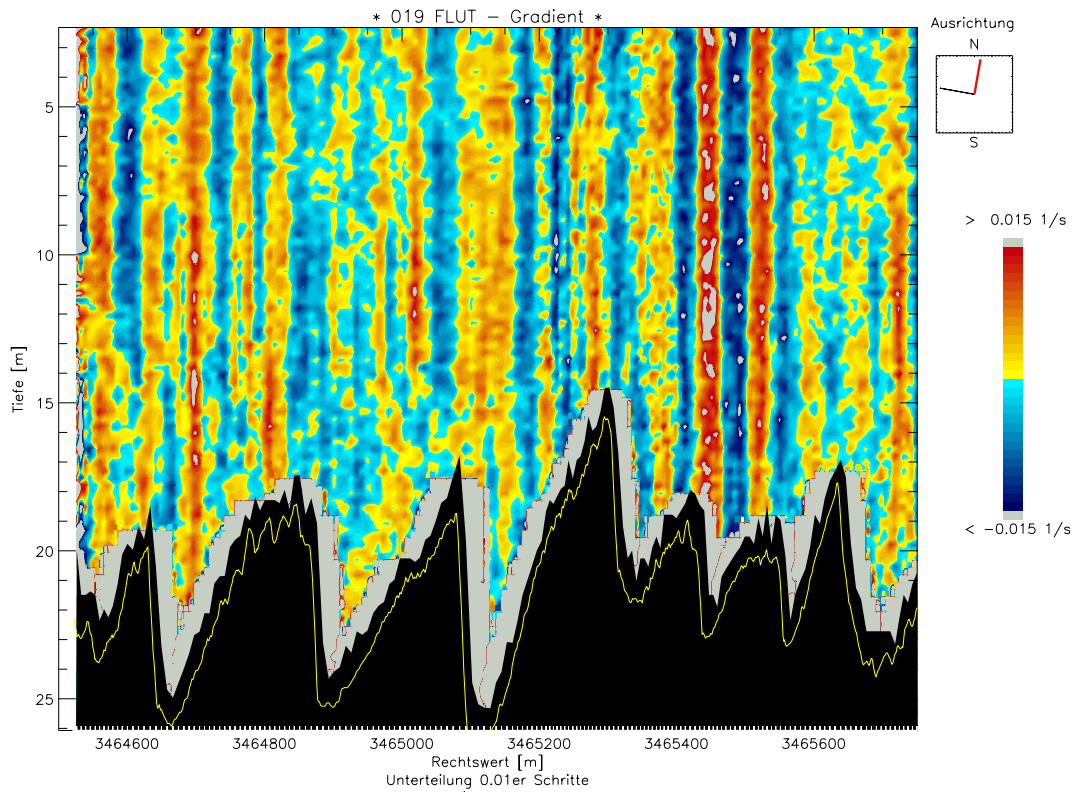


Abb. 6.26: $\partial u_{para} / \partial \text{Rechtswert}$ in der späteren Flutphase.

Nach der Theorie von [Alpers und Hennings 1984] sind unter Annahme einer konstanten parallelen Komponente ($u_{para} = \text{konstant}$) in der Ebbphase die Gradientenbeträge der Divergenzzone größer als die der Konvergenzzone. Für die Flutphase wird vom umgekehrten Fall ausgegangen (Abbildung 6.27).

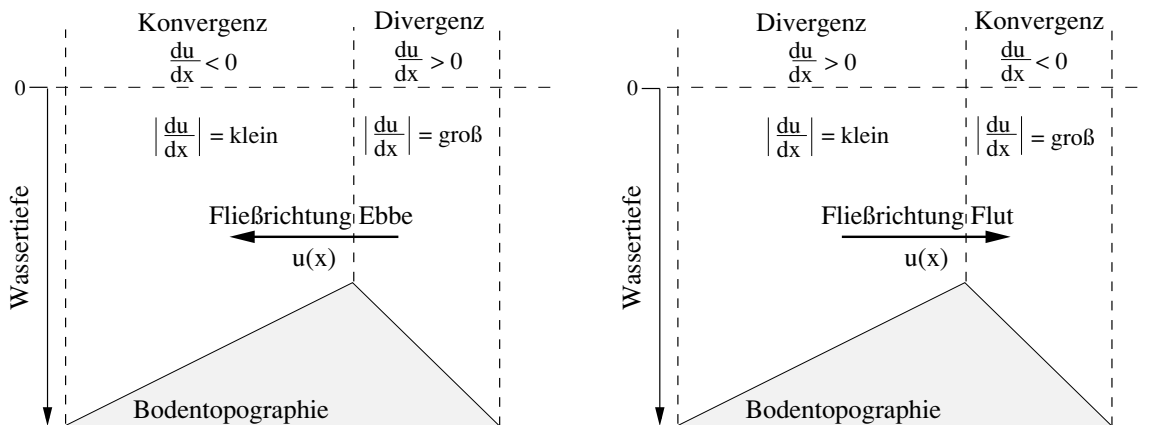


Abb. 6.27: schematischer Zusammenhang von Gradienten und Konvergenz- und Divergenzonen über asymmetrischen Sandwellen (u entspricht der Strömung, x der Achse senkrecht zu den Kämmen); links: Ebbphase, rechts: Flutphase; in Anlehnung an [Alpers und Hennings 1984].

Die vorliegenden Messungen bestätigen, dass die Gradientenbeträge der Divergenzonen der Ebbphase größer sind als die der Konvergenzonen. Das der umgekehrte Fall in den Abbildungen der Flutphase nicht so deutlich wird, mag am Einfluss der parallelen Komponente liegen. Um darüber nähere Aussagen machen zu können, wäre es sinnvoll, auch die Strömungsverteilung in Richtung der Kammverläufe zu betrachten. Zu diesem Zweck müssten zusätzlich ADCP-Profile gemessen werden, die parallel zum Kammverlauf liegen. Die Untersuchung der Verteilung des Strömungsbetrages ist im Rahmen dieser Arbeit nicht sinnvoll, da die Einflüsse des Sandwellenverlaufs und der Kammlinienverläufe nicht mehr zu unterscheiden wären.

Die Lage der Divergenzonen der senkrechten Komponente über den Steilhängen korrespondiert mit den bereits betrachteten Auftriebsphänomenen der vertikalen Komponente und erfüllt somit die Kontinuitätsgleichung. Gleiches gilt für die Konvergenzonen.

6.4 Bedeutung für Radarmessung

Anhand der vorangegangenen Betrachtungen ergibt sich, dass die Bodentopographie die Strömung signifikant beeinflusst und die asymmetrische Form der Sandwellen bei Ebbe größere Störungsschichtdicken hervorruft als bei Flut. Über den Sandwellenkämmen erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit. Letztendlich führen die Sandwellen zur Ausbildung von Konvergenz- und Divergenzonen, die sich in erhöhten bzw. verminderten Oberflächenrauigkeiten abbilden.

Die grobe Abschätzung der Anpassungsschicht ergibt bei der Annahme einer Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s bei Ebbe eine Schichtgröße von bis zu 16 m über der Störung und reicht somit reich bei Kammtiefen von 15.5 ... 20 m zur Abbildung von Signaturen an der Wasseroberfläche über den Sandwellen aus. Bei Flut werden geringere Schichtdicken erreicht. Die Beeinflussung der Anpassungsschicht

durch die voranschreitende Tidewelle kann nicht außer Acht gelassen werden, da die Tidewelle die Auswirkungen der Strömungsänderung durch die Sandwellen überlagert, sodass diese sich nicht mehr als einzelne Signaturen an der Oberfläche abbilden.

Die an den beiden Enden der Profile unterschiedlich fortgeschrittene Tidewelle wird bei Ebbe in der Isoliniendarstellung der Parallelkomponente, bei Flut in Grafiken der senkrechten Komponente (also bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten) deutlich. Wenn die senkrechte Komponente aufgrund ihrer höheren Strömungsgeschwindigkeiten einen bedeutenderen Einfluss auf die Signaturbildung hat als die Parallelkomponente, ist die Ebbphase zur Erzeugung von Oberflächensignaturen begünstigt.

Durch Advektion werden die Konvergenz- und Divergenzzonen abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit räumlich verschoben (vgl. Abbildung 6.28). In den vorliegenden Darstellungen liegt der Versatz der Konvergenz- und Divergenzzonen gegenüber den Sandwellenkämmen unterhalb der Auflösung.

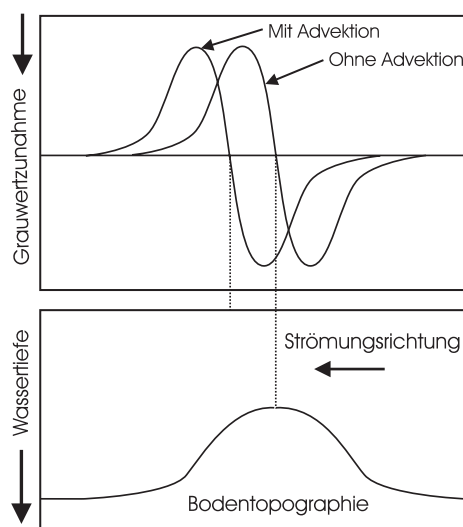


Abb. 6.28: schematische Darstellung der Advektionslänge bei hydrodynamischer Modulation durch die Bodentopographie, in Anlehnung an [Hennings 1988].

Die Abbildungen der Vertikalbewegung zeigen deutlich, dass die Strömung der oberen vier Meter durch das Schiff beeinflusst wird und daher für eine Analyse nicht mehr brauchbar ist. Dies gilt für alle Strömungskomponenten. Die Approximation der logarithmischen Strömungsschicht [Soulsby 1983], die in flachen Tidegewässern etwa 1...3 m aufwärts des Meeresbodens umfasst, kann nicht für die Berechnung der Strömungswerte an der Wasseroberfläche benutzt werden, da diese außerhalb dieser Schicht liegen. Bestehende Theorien unterstellen, dass sich die Beeinflussung der Strömung durch die Sandwellen, welche in den unteren Tiefen deutlich wird, nach oben hin zwar verringert, aber fortsetzt. Die Ausbildung einer deutlich erkennbaren Turbulenzstruktur an der Wasseroberfläche spricht für diese Vermutung.

Bei der vertikalen Komponente bildet sich der Bereich der Aufwärtsströmung bei Ebbe nahezu senkrecht vom Steilhang bis zur Wasseroberfläche aus. Gleiches gilt für die Abwärtsbewegung in der Flutphase. Sowohl bei Ebbe als auch bei Flut ist der Konvergenzbereich der vertikalen Komponente immer breiter als der Divergenzbereich. Da Divergenz mit einer erhöhten Rauigkeit der Oberfläche einhergeht, sind die Bereiche erhöhter Oberflächenrauigkeit schmaler, als die vermindert oberflächenrauen Gebiete.

Die parallele Komponente zeigt in der Ebb- und frühen Flutphase die Überlagerung durch die Tideunterschiede der Profilen und lässt keine Zuordnung der Strömungsänderungen zu der fortschreitenden Tidewelle bzw. der Modulation durch die Sandwellen zu. Bei Flut ist die Korrelation zwischen der Strömungsänderung der Parallelkomponente und der Änderung der Bodentopographie sehr gering, sodass

die Ursache für die Strömungsänderung nicht bzw. nicht nur an der Änderung der Bodentopographie festgemacht werden kann.

Die Geschwindigkeitserhöhung der senkrechten Komponente entsteht bei Ebbe direkt am Sandwellenkamm und reicht vom Boden bis in die Nähe der Wasseroberfläche. Sie entwickelt sich in Strömungsrichtung v-förmig, sodass nahe der Oberfläche breitere Bereiche höherer Geschwindigkeit vorherrschen als direkt am Sandwellenkamm. Die Flutphase zeigt bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten ähnliche Strukturen, die aufgrund der Strömungsrichtung und der flachen Luvhänge aber weniger deutlich ausgeprägt sind. Die Überlagerung durch die Tidewelle läßt in der späteren Flutphase keine Angaben zur Entstehung der Strömungsänderungen zu, da zwischen den Einflüssen durch die Tidewelle und die Sandwellen nicht unterschieden werden kann.

Abbildung 6.29 belegt die Änderungen der Oberflächenrauigkeit infolge der Überströmung der Sandwellen. Diese Aufnahme wurde mit einer Digitalkamera zum Zeitpunkt der Aufnahme eines der Strömungsprofile gemacht und zeigt die erhöhten Oberflächenrauigkeiten über den Kämmen der Sandwellen. Die Möglichkeit der Abbildung solcher Signaturen mittels Fotografien bestätigt die deutliche optische Erkennbarkeit der erhöhten Rauigkeit an der Wasseroberfläche.

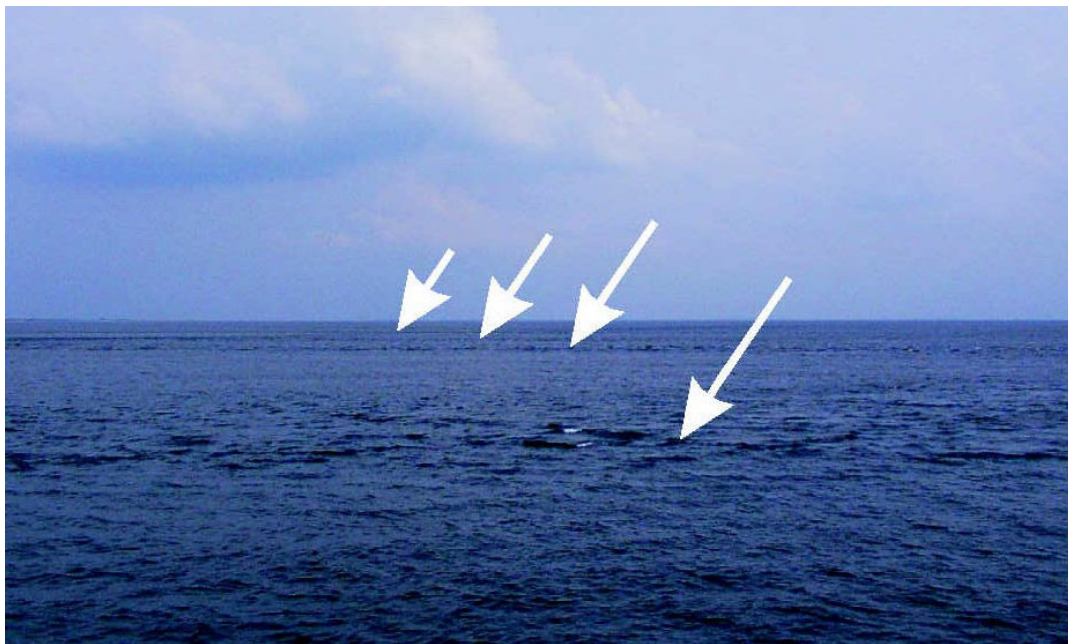


Abb. 6.29: Fotografie der durch die Sandwellen hervorgerufenen Signaturen an der Wasseroberfläche im Lister Tief, 10. August 2002 (Ebbphase).

Zur Erfassung von Signaturen in Radarbildern wird die Rückstreuung der elektromagnetischen Radarwellen an rauen Oberflächen des Wasserkörpers genutzt („sea clutter“). Lokal unterschiedliche Oberflächenrauigkeiten erzeugen aufgrund der unterschiedlich starken Radarrückstreuung im resultierenden Grauwertbild verschiedene Grauwerte. Eine Beeinflussung der oberen Wasserschichten durch das Schiff spielt bei Radarmessungen keine Rolle, da die Radarrückstreuung z.B. in Bereichen von 200 ... 800 m zum Schiff bestimmt wird.

Begünstigende Faktoren für die Abbildung der Sandwellensignaturen sind moderat starke Strömungen (0.5 ... 1 m/s), Wassertiefen von < 50 m und steile Strömungsluvhänge (> 10 %). Die durch hydrodynamische Modulation verursachten Variationen der kurzen Oberflächenwellen [Alpers und Hennings 1984]

(und somit der Grauwerte im Radarbild) spiegeln die Topographie des Meeresbodens wider und können in Karten dargestellt werden (vgl. Abbildung 6.30).

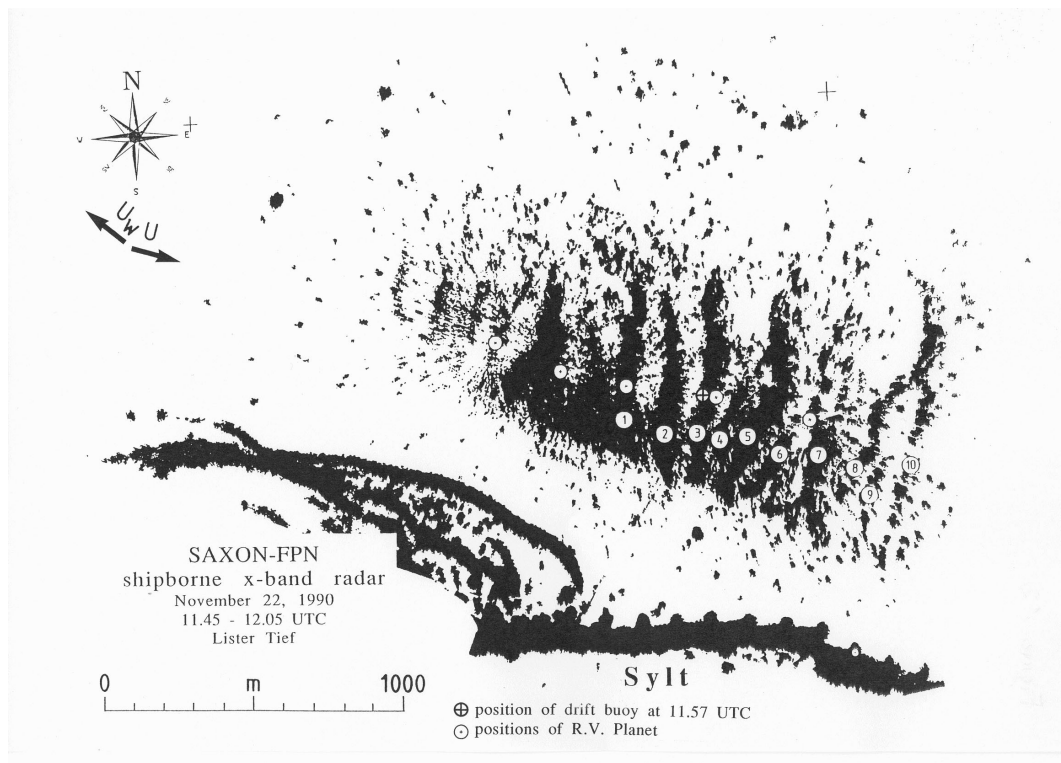


Abb. 6.30: Zusammenstellung von „sea clutter“ Bildern, aufgenommen mit dem GKSS schiffgestützten Radar am 22. November 1990 im Lister Tief [Hennings u.a. 1992].

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wurde untersucht, wie durch die Bodentopographie hervorgerufene Störungen der Strömung sich abbilden und inwiefern dies zu einer Ausbildung von Signaturen an der Wasseroberfläche führt.

Um Abbildungen des Strömungsfeldes in der Eulerschen Darstellung erzeugen zu können, wurden Programme entwickelt, mit deren Hilfe die Strömungsdaten aus ADCP-Messungen sowie die zugehörigen Navigationsdaten verarbeitet werden können. Alle Strömungsbeobachtungen wurden mehrfach bei verschiedenen starken Strömungen der Ebbe als auch der Flut jeweils auf dem gleichen Profil durchgeführt.

Da der Einfluss der Sandwellen untersucht werden sollte, wurden die ADCP-Daten in einem Koordinatensystem dargestellt, das von den Kammverläufen der Sandwellen abhängig ist (die Achsen dieses Systems verlaufen parallel und senkrecht zu den Sandwellenkämmen). Zusätzlich werden Abbildungen der Strömungsrichtung und Vertikalkomponente betrachtet.

Die parallele Komponente ist weder bei Ebbe noch bei Flut konstant und deutet durch Vorzeichendrehung im Verlauf des Profils auf den wellenförmigen Verlauf der Sandwellenkämme. Die Überlagerung der Strömungsstörung durch die voranschreitende Tidewelle bildet sich bei Ebbe in der parallelen, bei Flut in der senkrechten Komponente ab. Die Ebbprofile der senkrechten Komponente zeigen deutlich an den Sandwellenkämmen beginnende Bereiche erhöhter Strömungsgeschwindigkeit, die sich vom Boden bis zur Wasseroberfläche ausbilden. Die Darstellungen der Vertikalkomponente präsentieren regelmäßige Zirkulationsbereiche von Auftriebsphänomenen und abwärts gerichteter Strömung in Abhängigkeit von Ebbe und Flut über den Steil- bzw. Flachhängen der Sandwellen.

Die Isoliniengrafiken zeigen, dass Advektion eine wichtige Rolle in der Ausbildung von Oberflächen-signaturen beim Überströmen von Sandwellen spielt. Es konnte bestätigt werden, dass bei vorhandener moderater Strömung von > 0.5 m/s und einer Wassertiefe von < 50 m eine Variation der kurzen Oberflächenwellen durch die Bodentopographie hervorgerufen werden kann. Der Versatz der Signaturen zu den Sandwellenkämmen liegt unterhalb der Auflösung durch das ADCP (etwa 10 m ein Vertikalprofil).

In zukünftigen Feldexperimenten sollte versucht werden, die Datenerhebung zu optimieren, um die Schwierigkeiten bei der Auswertung zu minimieren. Eine erhebliche Erleichterung wird erreicht, wenn dem ADCP bereits während der Messung Kurswinkeldaten zur Verfügung stehen, die Ergebnisse der Strömungsmessung vor Ort am Bildschirm auf Plausibilität geprüft werden können und die nachträgliche Korrektur der Strömungsrichtung entfällt. Zur Vermeidung von Zeitdifferenzen in simultan erzeugten Dateien empfiehlt es sich, die Rechneruhren automatisch über Funkuhren zu synchronisieren.

Für weiterführende Untersuchungen ist denkbar, die Betrachtung der Strömungsvariationen durch Querprofilaten zu ergänzen und das Verhalten der Tidewelle bei Ebbe und Flut näher zu beleuchten.

Literaturverzeichnis

- lex 2000** *Lexikon der Geowissenschaften*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. 2000
- Albrand 2001** ALBRAND, Karl-Richard: *Vorlesungsskript Navigation 2*, 2001. – unveröffentlichtes Vorlesungsskript
- Allan 2000** ALLAN, P.G.: Cable security in sandwaves. In: *ICPC Plenary Meeting, Kopenhagen, May 2000*, 2000
- Alpers und Hennings 1984** ALPERS, Werner ; HENNINGS, Ingo: A Theory of the Imaging Mechanism of Underwater Bottom Topography by Real and Synthetic Aperture Radar. In: *Journal of geophysical research* 89 (1984), S. 10.529–10.546
- Baumann 1994** BAUMANN, Eberhard: *Vermessungskunde— Lehr- und Übungsbuch für Ingenieure, Bd.1*. 4., völlig überarbeitete Auflage. Dümmler/Bonn, 1994
- Baumann 1995** BAUMANN, Eberhard: *Vermessungskunde— Lehr- und Übungsbuch für Ingenieure, Bd.2*. Fünfte, bearbeitete und erweiterte Auflage. Dümmler/Bonn, 1995
- Bronstein u.a. 1999** BRONSTEIN, Ilja N. ; SEMENDJAJEW, Konstantin A. ; MUSIOL, Gerhard ; MÜHLIG, Heiner: *Taschenbuch der Mathematik*. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage der Neubearbeitung. Verlag Harri Deutsch, 1999
- Bruns 2001** BRUNS, Peter: *Hydrographie 2*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW), Hamburg, 2001. – unveröffentlichtes Vorlesungsskript
- Damm 2001** DAMM, Peter: *Ozeanographie*. Institut für Meereskunde, Hamburg, 2001. – unveröffentlichtes Vorlesungsskript
- Denker 1989** DENKER, Heiner: A new gravimetric quasigeoid for the Federal Republic of Germany. In: *Deutsche Geodätische Kommission Reihe B* (1989), Nr. 291
- Dietrich u.a. 1992** DIETRICH, Günter ; KALLE, Kurt ; KRAUSS, Wolfgang ; SIEDLER, Gerold: *Allgemeine Meereskunde — Eine Einführung in die Ozeanographie*. 3. neubearbeitete Auflage. Gebrüder Borntraeger- Berlin- Stuttgart 1975, 1992
- Egge 2000** EGGE, Delf: *Mathematische Geodäsie*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW), Hamburg, 2000. – unveröffentlichtes Vorlesungsskript
- von Fabeck 1980** FABECK, Wolf von: *Kreiselgeräte*. 1.Auflage. Vogel-Verlag, 1980
- Fanger u.a. 1998** FANGER, Hans-Ulrich ; BACKHAUS, Jan ; HARTKE, D. ; HÜBNER, Udo ; KAPPENBERG, Jens ; MÜLLER, Agmar: 2.3.1 Hydrodynamik im Lister Tidebecken: Messungen und Modellierung. In: GÄTJE, Christiane (Hrsg.) ; REISE, Karsten (Hrsg.): *Ökosystem Wattenmeer: Austausch-, Transport- und Stoffumwandlungsprozesse*, Springer Verlag, 1998

- Gass und Course-Team 1984** GASS, Ian G. ; COURSE-TEAM: Oceanography: Sediments. In: *The Open University* (1984)
- van Gastel 1987** GASTEL, K. van: Velocity profiles of tidal currents over sand waves. In: *Netherlands Journal of Sea Research* 21 (3) (1987), S. 159–170
- GKS** GKSS-Forschungszentrum. – <http://www.gkss.de>
- Goffinet 2001** GOFFINET, Patrick: Qualitätssteigerung der Seevermessung und Navigation durch neuartige Beschickungsverfahren. In: *Wissenschaftliche Arbeiten Universität Hannover* 239 (2001), S. 25–30. – <http://www.ife.uni-hannover.de/Pubs/seeber60/goffinet.pdf>
- Gordon 1996** GORDON, R. L.: *Acoustic Doppler Current Profilers: Principles of Operation— A Practical Primer*. 1996
- Grossmann 1976** GROSSMANN, Walter: *Geodätische Rechnungen und Abbildungen in der Landesvermessung*. Dritte, auf numerische Rechnungen abgestellte Auflage. Verlag Konrad Wittwer, 1976
- Heiskanen und Moritz 1967** HEISKANEN, Weikko A. ; MORITZ, Helmut: *Physical Geodesy*. W.H. Freeman and Company, San Francisco, 1967
- Hennings 1988** HENNINGS, Ingo: *Abbildung von submariner Bodentopographie auf Luft- und Satellitenbildern im Mikrowellenbereich und im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums*. GKSS report 88/E/41, 1988. – Doktorarbeit, Universität Bremen
- Hennings u.a. 2000** HENNINGS, Ingo ; LURIN, B. ; VERNEMMEN, C. ; VANHESSCHE, U.: On the behaviour of tidal current directions due to the presence of submarine sand waves. In: *Marine Geology* 169 (2000), S. 57–68
- Hennings u.a. 1992** HENNINGS, Ingo ; STOLTE, Siegfried ; ZIEMER, Friedwart: *Imaging Surface Signatures of Submerged Dunes in a Tidal Inlet of the German Bight during the SAXON-FPN Project*, GKSS Forschungszentrum Geesthacht, 1992
- Hop** Hopf. – <http://hopf.com/de/index.html>
- Hyd** Hydrographic Service GmbH. – <http://www.hydrographic-service.de>
- Min 2001** Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein: *Generalplan Küstenschutz, Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein*. 2001
- Nat** National-Marine-Electronics-Association. – <http://www.nmea.org>
- Pfeilsticker 2002** PFEILSTICKER, Klaus: *Physik IV (Umweltp Physik)*. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2002. – Vorlesungsskript
- RDI** RDInstruments. – <http://www.rdinstruments.com>
- Res** Reson. – http://www.reson.com/navisound/products/echo/mcs_2000/datasheet.htm
- Rosengarten 1987** ROSENGARTEN, Hartmut: *Ein geometrisches Modell der Wasseroberfläche zur Beschickung von Küstenvermessungen*. 1987. – Dissertation, Universität Hannover
- Schlittgen und Streitberg 1991** SCHLITTEGEN, Rainer ; STREITBERG, Bernd: *Lehr- und Handbücher der Statistik: Zeitreihenanalyse*. 4. Auflage. Oldenbourg, 1991

Simpson 2001 SIMPSON, Michael R.: *Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler*. 2001

Soulsby 1983 SOULSBY, J.R.: The Bottom Boundary Layer of Shelf seas. In: JOHNS, Bryan (Hrsg.): *Physical oceanography of coastal and shelf seas*, Elsevier oceanography series, 1983

Torge 2003 TORGE, Wolfgang: *Geodäsie*. 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Walter de Gruyter Berlin, 2003

Tri Trimble. – <http://www.trimble.com/dsm12212.html>

Uni Universität Karlsruhe (TH). – <http://www.info.uni-karlsruhe.de>

Urlick 1983 URICK, R.J.: *Principles of Underwater Sound*. Third Edition. McGraw-Hill, New York, 1983

V2T V2T. – <http://valdisc.gkss.de>

Vis Visual Numerics. – <http://www.visual-numeric.de>

Glossar

Aliasing-Effekt Der Aliasing-Effekt entsteht, wenn die in einer Zeitreihe beobachtete Größe nicht kontinuierlich gemessen, sondern nur an diskreten Zeitpunkten abgetastet wird
[Schlittgen und Streitberg 1991]

CTD-Sonde ozeanographische Sonde mit der Leitfähigkeit, Temperatur und Tiefe bestimmt werden

Datenalter Alter der differentiellen GPS-Daten (Korrekturdaten) seit dem letzten Update

DGPS GPS System, das durch den Empfang von Korrektursignalen durch eine andere Station eine gesteigerte Genauigkeit in der Positionsbestimmung erreicht

DHDN geodätisches Datum der deutschen Landesvermessung

EGG97 (European Gravimetric Geoid 1997) europäisches gravimetrisches Quasigeoidmodell aus dem Jahre 1997

4GL (4th Generation Language) „Integration von Datenbank- und Benutzerschnittstellenanweisungen in die Programmiersprache; Befehle zur Abfrage und Manipulation einer Datenbank; Befehle zur einfachen Erstellung von Benutzeroberflächen“ [Uni]

geodätische Linie kürzeste Verbindung zweier Punkte auf einer Fläche

Gauß-Krüger-Koordinatensystem (GK-Koordinatensystem) ebenes winkeltreues Koordinatensystem der deutschen Landesvermessung

GKSS Forschungszentrums GmbH (GKSS) Forschungszentrum, das zum Bau von atombetriebenen Schiffen gegründet wurde; heute sind die Schwerpunkte des Zentrums jedoch Atmosphärenphysik, Chemie, Forschungsreaktor, Werkstoff- und Küstenforschung

Morphodynamik (Geomorphodynamik), alle reliefbildenden Prozesse (aktuelle geomorphologische Prozesse) [lex 2000]

Stampfen Stampfen des Schiffes durch Seegang: Das Boot schwingt um seine Querachse, das Vorschiff taucht periodisch ein.

PDOP Indikator für die Genauigkeit der dreidimensionalen GPS-Position

Radarhydrographie (KOR) Abteilung am Institut für Küstenforschung (GKSS), die sich mit der Entwicklung von Instrumenten und Analysemethoden zur Bestimmung von hydrographischen Parametern wie Seegang, Strömung, Bathymetrie und Windschubspannung beschäftigt

Rollen Rollen des Schiffes durch Seegang: Das Boot krängt rhythmisch um seine Längsachse, erst zur einen, dann zur anderen Seite. Rollbewegungen können durch verschiedene Einflüsse ausgelöst und verstärkt werden, in der Hauptsache aber durch Einwirkung der Wellen.

RTCM 2.0 Datenformat der Korrektursignale des DGPS Systems von 1990, es wird eine Lagegenauigkeit von 0.5–1m erreicht

Seekartennull (SKN) Bezugshorizont für die Angabe von Tiefen in Seekarten, der aus langjährigen Pegelbeobachtungen abgeleitet wird und daher kein einheitlicher Bezugshorizont ist. SKN bezeichnet einen Wasserstand, der nur selten unterschritten wird, sodass die Tiefenangaben der Seekarten bei besonders niedrigem Niedrigwasser noch für die Schifffahrt verbleiben

Seemeile (sm) Die internationale nautische Meile ist exakt 1.852 km

Strömungskante Struktur, die aufgrund der Überströmung von großen Gradienten der Meeresbodentopographie an der Wasseroberfläche sichtbar wird

Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mir während dieser Arbeit hilfreich und motivierend zur Seite gestanden haben.

Ich danke Herrn Dr. rer. nat. Friedwart Ziemer für die interessante Themenstellung, die freundliche Aufnahme in die Abteilung Radarhydrographie und die Begutachtung der Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Delf Egge möchte ich für das Interesse an dieser Arbeit, die Unterstützung in vermessungstechnischen Fragen und die Begutachtung dieser Arbeit danken.

Mein besonderer Dank gilt Dipl.-Oz. Dagmar Herbers, die immer die Zeit fand, mir bei meiner Arbeit mit wertvollen Ratschlägen und Hilfen bei der Interpretation der Messergebnisse zur Seite zu stehen.

Des weiteren danke ich Dr. rer. nat. Nicole Braun, Gottfried Schymura, Dipl.-Ing. (FH) Marius Cysewski und Dr. rer. nat. Ingo Hennings, die während meiner Diplomandenzeit stets für Fragen und Diskussionen offen waren.

Bedanken möchte ich mich auch bei Dr. Hermann Kuhn für die Hilfe bei allen Problemen technischer Art. Auch danke ich Helmut Bornhöft und Jan Marks, die als Besatzung der „Ludwig Prandtl“ zur erfolgreichen Durchführung der Messungen beigetragen haben.

Dem GKSS-Forschungszentrum danke ich für die materielle und fachliche Unterstützung. Diese Arbeit wurde aus Mitteln des EU-Projektes OROMA (FP5, EVK3-CT-2001-00053) teilweise finanziert.

Besonders herzlich bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mir durch ihre finanzielle Unterstützung meine Ausbildung ermöglicht und die Entstehung der Arbeit mit Interesse verfolgt und gefördert haben.

A Kopfzeilenblock der Strömungsdatei

Die komplette Kopfzeilenblock setzt sich aus neun Zeilen zusammen und sieht folgendermaßen aus:

```

      Sylt KOR
      ( Ludwig Prandtl CFG:Sylt )
      25      25      170      100      4      5      4
      2 8 10 5 2 11 92      4      0      0.550      -0.180      90.000      19.340
      280.30      -91.20      1.60      2.00      -32768      -32768      -32768      -32768      22.90      23.06      22.90      23.56
      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00
      30000.0000000      30000.0000000      -32768      -32768      0.0
      0.0      0.0      0.0      0.0      -0.0      0.0      -0.0      2.3      21.3
      100 cm BT dB 0.43 0.370

```

Abb. A.1: Kopfzeilenblock der ADCP-Datei kor***t.000.

In den einzelnen Zeilen des Kopfzeilenblockes sind nachfolgende Informationen enthalten:

1. Zeile: steht zur Eingabe z. B. eines Namens zur Verfügung

```

_____Sylt__

```

2. Zeile: Platz für die Eingabe weiterer Informationen

```

_____ ( _Ludwig_Prandtl_____CFG:Sylt_ )

```

3. Zeile:

- Tiefenzellenlänge [cm]
- Wartezeit nach der Übertragung des Impulses
- Tiefe des Schwingers (wird aus CFG File übernommen) [cm]
- Anzahl der Tiefenzellen
- Anzahl der Pings pro Ensemble
- Zeit pro Ensemble [s]
- Messmode

```

_____25_____25_____170_____100_____4_____5_____4

```

4. Zeile:

- Ensemblezeit: Jahr, Monat, Tag, Stunden, Minute, Sekunde, Hundertstel Sekunde
- Ensemblenummer
- Anzahl der Ensembles im Segment
- gemittelter Stampffehler für das Ensemble
- gemittelter Rollfehler für das Ensemble

- korrigierter Kurswinkel — Mittel von ADCP-Kurswinkel+ Kurswinkel Offset - Magnetische Variation
- Temperaturmittel für das Ensemble

2.8.10.5.2.11.92.4.0.0.550.0.180.90.000.19.340

5. Zeile:

- mittlere Bodenverfolgungsgeschwindigkeit [cm/s]: Ost(+)/West(-); Nord(+)/Süd(-); Vertikal [aufwärts(+), abwärts(-)]; Error
- Referenzwasserschicht- Geschwindigkeit [cm/s]: Ost(+)/West(-); Nord(+)/Süd(-); Vertikal [aufwärts(+), abwärts(-)]; Error
- Tiefenmittel[m]: Strahl 1, Strahl 2, Strahl 3, Strahl 4

280.30.91.20.1.60.2.00.32768.32768.32768.32768.22.90.23.06.22.90.23.56

6. Zeile:

- gesamter Weg während des Ensembles [m]
- verstrichene Zeit während des Ensembles [s]
- Bewegung im Nordwert [m]
- Bewegung im Ostwert [m]
- gutgemachter Kurs [m]

0.00.0.00.0.00.0.00.0.00.0.00

7. Zeile Navigationsdaten:

- mittlere Breite [°]
- mittlere Länge [°]
- mittlere Schiffsbewegung in Ost/West [cm/s]
- mittlere Schiffsbewegung in Nord/Süd [cm/s]
- gesamte während des Ensembles zurückgelegte Entfernung [cm]

30000.000000.30000.000000.32768.32768.0.0

8. Zeile Durchflußwerte:

- Mittelteil des Profiles [m³/s] (gemessen)
- oberer Teil des Profiles [m³/s] (geschätzt)
- unterer Teil des Profiles [m³/s] (geschätzt)
- Durchflus im Startgebiet des Profiles [m³/s] (geschätzt)
- Startentfernung des Profiles zum Ufer[m]
- Durchfluß im Endgebiet des Profiles [m³/s] (geschätzt)
- Endentfernung dse Profiles zum Ufer [m]
- Starttiefe der Mittelschicht oder Endtiefe der oberen Schicht [m]
- Endtiefe der Mittelschicht oder Starttiefe der Bodenschicht [m]

0.0_____0.0_____0.0_____0.0_____0.0_____0.0_____0.0_____0.0_____2.3_____21.3

9. Zeile:

- Anzahl der Tiefenzellen, die zu beachten sind
- Messeinheit [cm]
- Geschwindigkeitsreferenz [Bodenverfolgung, unbewegte Wasserschicht oder keine]
- Intensitätseinheiten [dB]
- Skalierungsfaktor der Intensität [dB/Zahl]
- Schallabsorptionsfaktor [dB/m]

100_cm_BT_dB_0.43__0.370

B Erläuterungen zum NMEA-0183

1983 wurde erstmalig von der amerikanischen *National Marine Electronics Association* (NMEA) ein *Standard for Interfacing Marine Electronic Devices* — NMEA 0183 definiert, der Anforderungen an das Übertragungssignal, das Datenübertragungsprotokoll und die Datensätze definiert [Nat]. NMEA-0183 hat über den nautischen Einsatzbereich hinaus Anwendung gefunden. So sind zum Beispiel einige GPS-Empfänger in der Lage ihre Daten als NMEA-Datensatz auszugeben. Im NMEA-Datensatz finden ausschließlich ASCII-Zeichen sowie *Carriage Return* (CR) und *Line Feet* (LF) Anwendung.

Jeder Datensatz beginnt mit einem \$ und besteht maximal aus 82 Zeichen. Die Daten werden jeweils durch ein Komma getrennt. Das Ende einer Zeile bildet eine optimale Prüfsumme und CR/LF. Die in der Arbeit verwendeten Datensatztypen GGA und VTG werden im folgenden näher erläutert.

Eine NMEA Dokumentation kann angefordert werden, Informationen finden sich auch auf der Internetseite <http://www.nmea.org>.

B.1 GGA

GGA-Beispielzeile aus einer der entstandenen KOR***n.000 Dateien:

```
$GPGGA,050235,5503.3876716,N,00827.9738270,E,2,07,1.1,7.50,M,44.60,M,7.8,0705*64
```

Dieser GGA Satz enthält Informationen über die Zeit, Position und Datenqualität der GPS-Messung. Im einzelnen sind das:

- UTC Zeit zur Zeit des Positionsfixes
- Länge und ihre Richtung (N oder S)
- Breite und ihre Richtung (O oder W)
- GPS Qualitätsanzeiger: 0= Fix noch nicht gültig, 1=GPS Fix, 2=DGPS Fix
- Anzahl der benutzten Satelliten
- HDOP = horizontal dilution of precision
- Antennenhöhe zum Geoid
- Einheit der Höhe M=[m]
- Geoidundulation
- Einheit der Geoidundulation M=[m]
- Datenalter
- ID der Basestation

B.2 VTG

VTG-Beispielzeile aus einer KOR***n.000 Datei:

```
$GPVTG,287.3,T,,005.80,N,010.74,K,D*44
```

Im allgemeinen sind dem VTG Datensatz Informationen zu Kurs und Fahrt über Grund zu entnehmen. Die Datenzeile setzt sich hierbei aus folgendem zusammen:

- gutgemachter Kurs
- 'T' zeigt, daß der gutgemachte Kurs relativ zu Nord ist
- wird nicht benutzt
- wird nicht benutzt
- Fahrt über Grund in kn
- 'N' zeigt, das die Fahrt über Grund in Knoten angegeben ist
- Fahrt über Grund in km/h
- 'K' zeigt, dass die Fahrt über Grund in km/h angegeben ist

B.3 cfg-File

BEGIN RDI CONFIGURATION FILE

COMMUNICATIONS

```
{
ADCP          ( ON   COM1 9600 N 8 1 ) [ Port Baud Parity Databits Stopbits ]
ENSOUT        ( OFF  COM2 9600 N 8 1 ) [ Port Baud Parity Databits Stopbits ]
NAV           ( ON   COM2 4800 N 8 1 ) [ Port Baud Parity Databits Stopbits ]
REFOUT        ( OFF  COM4 9600 N 8 1 ) [ Port Baud Parity Databits Stopbits ]
EXTERNAL      ( OFF  COM3 9600 N 8 1 ) [ Port Baud Parity Databits Stopbits ]
}
```

ENSEMBLE OUT

```
{
ENS CHOICE    ( N N N N N N N N ) [ Vel Corr Int %Gd Status Leader BTrack Nav ]
ENS OPTIONS   ( NONE 1 8 1 8 ) [ Ref First Last Start End ]
}
```

ADCP HARDWARE

```
{
Firmware      ( 5.46 )
Angle         ( 20 )
Frequency     ( 1200 )
System        ( BEAM )
Mode          ( 4 )
Orientation   ( DOWN )
Pattern       ( CONVEX )
}
```

DIRECT COMMANDS

```
{
WS25
WF25
BX300
WN100
WD111100000
WP00004
BP004
WM4
TP000005
EZ0021101
EX00000
BC025
}
```

RECORDING

```
{
Deployment ( KOR )
Drive 1 ( C )
Drive 2 ( C )
ADCP ( YES )
Average ( YES )
Navigation ( YES )
}
```

CALIBRATION

```
{
ADCP depth ( 1.70 m )
Heading / Magnetic offset ( 0.00 0.00 deg )
Transducer misalignment ( 0.00 deg )
Intensity scale ( 0.43 dB/cts )
Absorption ( 0.370 dB/m )
Salinity ( 30.0 ppt )
Speed of sound correction ( YES )
Pitch & roll compensation ( YES )
Tilt Misalignment ( 0.00 deg )
Pitch_Offset ( 0.000 deg )
Roll_Offset ( 0.000 deg )
}
```

```

Top discharge estimate ( POWER )
Bottom discharge estimate ( POWER )
Power curve exponent ( 0.1667 )
}

PROCESSING
{
Average every ( 2.00 s )
Depth sounder ( NO )
MaxFileSize ( 1200 )
Refout_info ( 1 8 30.00 1.000 0 1) [bins:1st last, limit, weight, format, delaysec]
External_formats ( LIFO N N N N ) [ LIFO_ON HDT HDG RDID RDIE ]
External_decode ( N N N N ) [ heading pitch roll temp ]
}

GRAPHICS
{
Units ( SI )
Velocity Reference ( BOTTOM )
East_Velocity ( -200.0 200.0 cm/s )
North_Velocity ( -200.0 200.0 cm/s )
Vert_Velocity ( -15.0 15.0 cm/s )
Error_Velocity ( -40.0 40.0 cm/s )
Depth ( 1 100 bin )
Intensity ( 60 100 dB)
Discharge ( -10 10 m3/s )
East_Track ( -4331 9794 m )
North_Track ( -2732 11393 m )
Ship track ( 3 bin 50.0 cm/s )
Proj_Velocity ( -150.0 150.0 cm/s )
Proj_Angle ( 315.0 deg from N )
Bad_Below_Bottom ( YES )
Line1 ( Sylt KOR )
Line2 ( Ludwig Prandtl CFG:Sylt )
}

HISTORY
{
SOFTWARE ( BB-TRANSECT )
Version ( 2.72 )
}

END RDI CONFIGURATION FILE

```

C Abbildungen zum Experimentaufbau

C.1	Navigationsrechner, Funkuhr, Echolot	116
C.2	Breitband ADCP von RDI	117
C.3	CTD-Sonde	118
C.4	ADCP-Steuergerät und Aufzeichnungsrechner	119

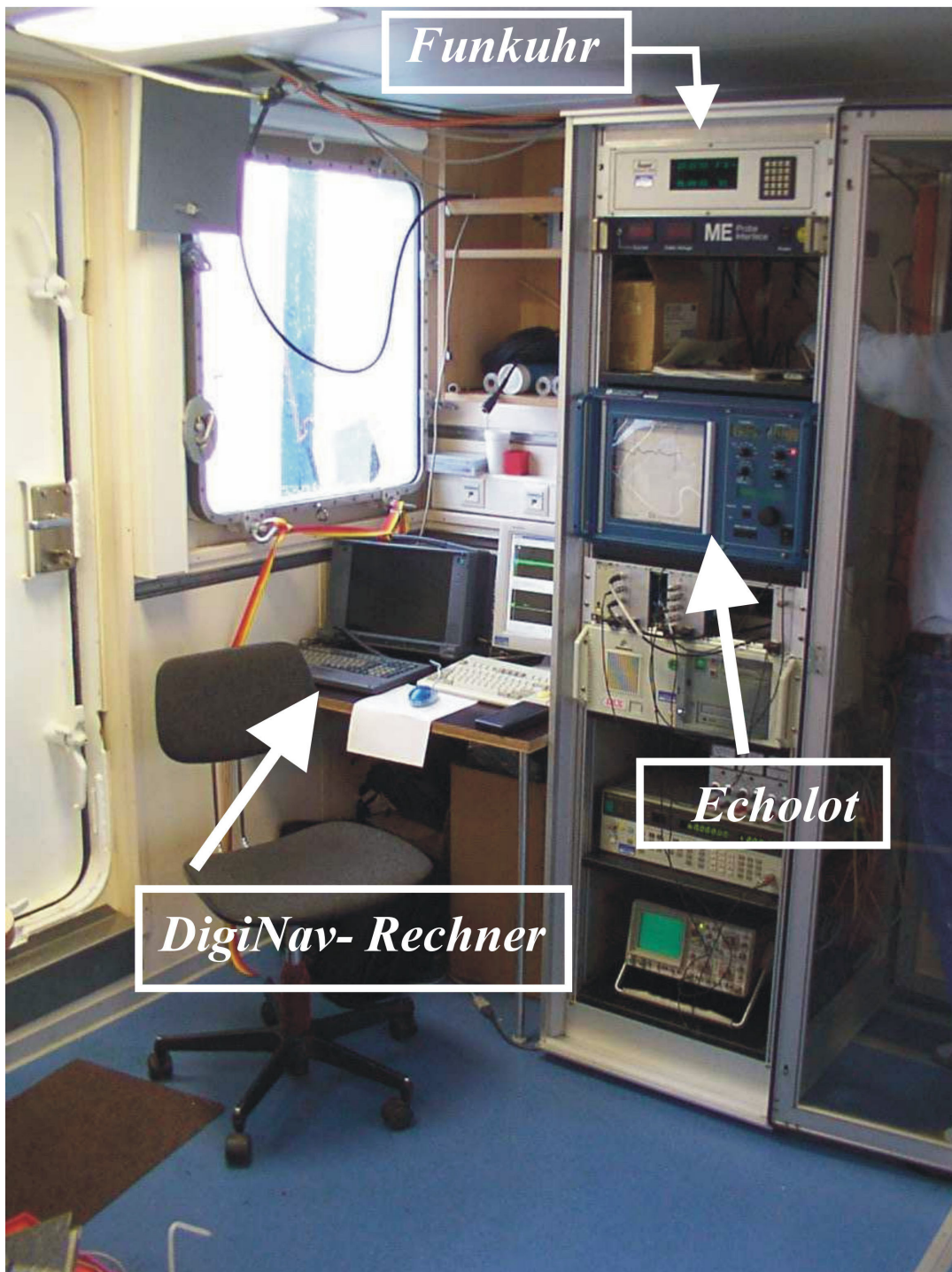


Abb. C.1: Aufbau von Navigationsrechner, Funkuhr und Echolot an Bord.

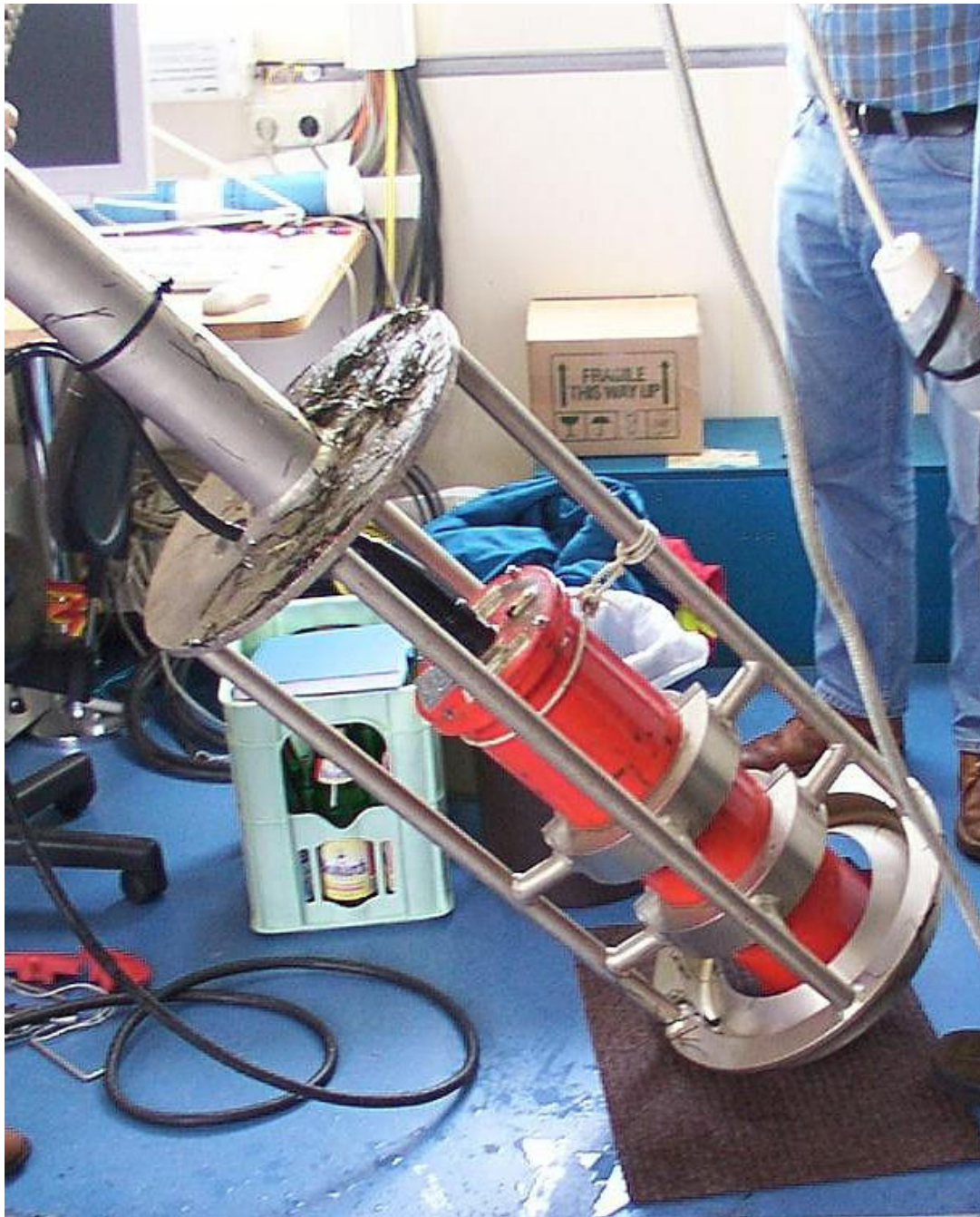


Abb. C.2: Abbildung des RDI-Breitband-ADCP's 1200 kHz, bevor es in den Moonpool abgelassen wird.



Abb. C.3: Abbildung der CTD-Sonde (ME Ecosonde).

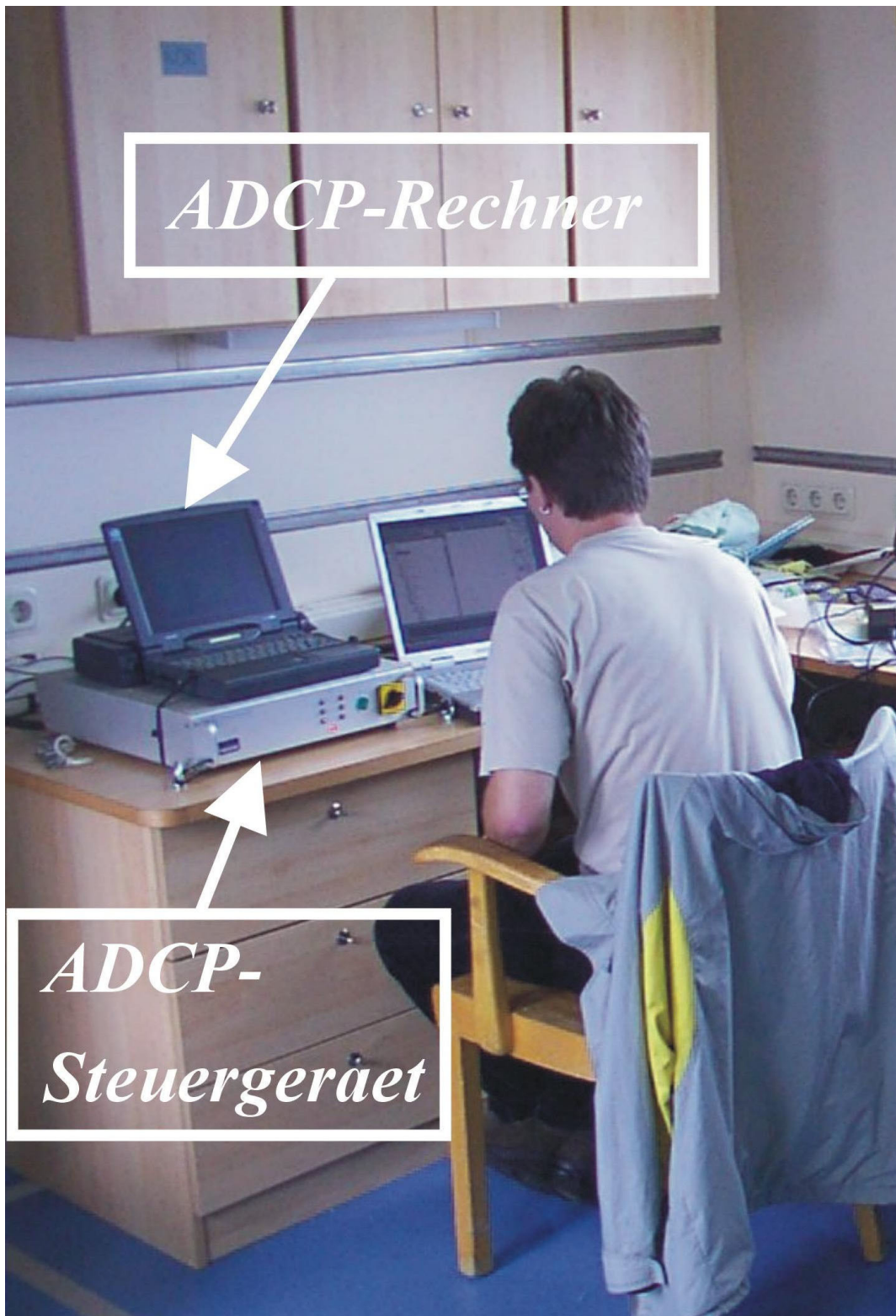


Abb. C.4: Aufbau der ADCP-Einheit bestehend aus ADCP-Steuergerät und Aufzeichnungsrechner.