

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fachbereich Geomatik

Aufarbeitung und Visualisierung einer bathymetrischen
Vermessung in Verbindung mit Seismogrammen der
Sedimentechographie

Diplomarbeit

von

Alexander Iffland

Betreuender Prüfer: Prof. Dr.-Ing. D. Egge
Zweiter Prüfer: Dr.-Ing. H.W. Schenke

Januar 2004

Kurzzusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Daten einer systematischen Vermessung in der Lazarev Sea nahe des Fimbul-Ice-Shelfs (Fimbulisen) genutzt, die während der Expedition ANT XIX-2 mit dem Fächersonarsystem Hydrosweep DS-2 und dem Sedimentecholot Parasound erhoben wurden.

Nach kurzer Darstellung der Hintergründe dieser durchgeführten Untersuchungen in dem Messgebiet wird allgemein auf wesentliche Aspekte der Hydroakustik hinsichtlich der Anwendung von Echolotsystemen eingegangen. Schwerpunktmäßig soll dabei der parametrischen Effekt, das Messprinzip parametrischer Sedimentecholote, behandelt werden. Nach anschließender Anführung zweier praktischer Anwendungen hydroakustischer Messverfahren anhand des Hydrosweep DS-2 und des Parasound-Systems wird eingehend deren Positionierung auf FS 'Polarstern' dargestellt, da sich bei der Aufbereitung der Messungen zeigte, dass sich das größte Problem der Daten beider Systeme in der minderwertigen Qualität der Navigationsdaten abzeichnete.

Aus den bereinigten Tiefendaten der Fächersonarmessung wird ein digitales Geländemodell (DGM) mit einer Rasterweite von 100 m generiert. Dieses Modell liegt für die weitere Bearbeitung digital und in Form einer bathymetrischen Karte im Maßstab 1 : 250 000 vor, bei der die Topographie des Canyon-Systems nahe dem Fimbulisen durch Isolinien mit einer Aquidistanz von 50 m dargestellt wird.

Die als Ergebnis der prozessierten Parasound-Daten erhaltenen Seismogramme, die gefiltert im digitalen Bildformat mit bekannter Start- und Endposition für einen definierten Tiefenbereich vorliegen, können zusammen mit dem DGM in einem dreidimensionalen Modell dargestellt werden. Dieses in digitaler Form vorliegende Modell kann durch den Nutzer interaktiv durchschritten und die darin enthaltenen Messergebnisse in ihrer Gesamtheit sowie in Detailansichten aus verschiedenen Perspektiven betrachtet werden, was das gegenseitige Verständnis und Einschätzung der Ergebnisse aus den beiden Messverfahren fördert. Diese gemeinsame Darstellungsweise eines digitalen Geländemodells in Kombination mit den Seismogramm-Bildern des Sedimentecholotes Parasound bietet sich auch hinsichtlich einer geologischen Klassifizierung der verschiedenen Echantypen und einer anschließenden Interpretation der Sedimentationsvorgänge in einem flächenhaft vermessenen Gebiet an.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Allgemeine Einleitung	1
1.2 Das seismologische Netzwerk an der Neumayer Station	1
1.3 Das Untersuchungsgebiet	6
1.4 Zielsetzung	7
2 Grundlagen und Anwendungen hydroakustischer Messverfahren	9
2.1 Einführung in die Hydroakustik	9
2.2 Erzeugung und Ausbreitung von Schallwellen	9
2.3 Richtcharakteristik von Schallgebern	12
2.4 Nichtlineare Akustik und der parametrische Effekt	15
2.5 Technische Konzeption des Hydrosweep DS-2	22
2.6 Technische Konzeption des Parasound Echolotsystems	26
2.7 Positionierungskonfiguration auf dem FS ‘Polarstern’	32
3 Aufbereitung und Visualisierung der Fächerlotdaten	37
3.1 Datengrundlage und -formate	37
3.2 Messdatenaufbereitung	39
3.2.1 Fehlereinflüsse bei Fächerlotmessungen	39
3.2.2 Prozessierung mit Caris Hips	40
3.2.3 Positionsdatenbereinigung	41
3.2.4 Wasserschallkorrektur	45
3.2.5 Tiefeneditierung	47
3.3 Arbeitsschritte in ArcInfo	52
3.3.1 Koordinatentransformation	52
3.3.2 Gridberechnung	52
3.3.3 Glättung des Geländemodells	55
3.3.4 Genauigkeitsbetrachtung	58
3.3.5 Erstellung der bathymetrischen Karte	61
3.4 Dreidimensionale Visualisierung des DGMS	63

4	Prozessierung der Parasound-Seismogramme	67
4.1	Das PS3-Format	67
4.2	Datengrundlage	68
4.3	Die SeNT Software	69
4.4	Navigationsbereinigung	72
4.5	Filterung der Seismogrammdarstellungen	75
4.6	Tiefenfensterkorrektur	77
5	Gemeinsame Darstellung	81
5.1	Einhängen der Seismogrammbilder	81
5.2	Der Navigation folgende Parasound- Darstellungen	83
5.3	Problem der Bildauflösung und Datenmenge	85
6	Interpretation der Ergebnisse	89
6.1	Typische Echoformen	89
6.2	Schlussfolgerungen	94
7	Zusammenfassung und Ausblick	99
7.1	Zusammenfassung	99
7.2	Ausblick	101
	Literaturverzeichnis	103
	Danksagung	107
A	Anhang A Abkürzungen	109
B	Anhang B: Wasserschallformel nach Chen-Millero	111
C	Quelltext der AML-Scripte zur Kartenerstellung in ArcInfo	113
C.1	AML-Quelltext zur Karte	113
C.2	AML-Quelltext zur Darstellung des Inhaltes der Hauptkarte	120
C.3	AML-Quelltext zur Nebenkarte – Sheet Index	127
C.4	AML-Quelltext zur Nebenkarte – Track Lines	128
C.5	AML-Quelltext zum Kartenbegleittext	132
C.6	AML-Quelltext zur Kartenlegende	135
D	Bathymetrische Karte des Canyon-Systems nahe Fimbulisen 1 : 250 000	143
D.1	Canyon System Bathymetry off Fimbulisen 1 : 250 000	143

Abbildungsverzeichnis

1.1	Das seismologische Netzwerk der Neumeyer Station	2
1.2	Isoliniendarstellung des Untersuchungsgebietes mit Tracklinien der ANT XIX-2	5
2.1	Aufbau von Wellenfronten nach dem <i>Huygens</i> 'schen Prinzip.	10
2.2	Geometrie eines rechteckigen Schallgebers	13
2.3	Richtcharakteristik D eines kreisrunden Wändlers	14
2.4	Schematische Darstellung der Zustandsgleichung für Luft und Wasser .	16
2.5	Ausbreitungsmuster einer finiten monofrequenten, akustischen Welle . .	18
2.6	Richtcharakteristik einer parametrischen Quelle	20
2.7	Prinzip der Kreuzfächerkalibrierung	24
2.8	Darstellung der Laufzeitmessung nach Amplitudenverfahren	25
2.9	Technische Konzeption und Gerätekomponenten der Parasound Anlage	27
2.10	Darstellung einer Punktquelle und eines Empfänger-Arrays	29
2.11	Schematische Skizze der Positionssensoren auf FS 'Polarstern'	34
3.1	Trackplot der Messprofile im Untersuchungsgebiet	38
3.2	Gemeinsame Darstellung der Trackplots verschiedener Positionssensoren	42
3.3	Darstellung des Verlaufes der Tracklinien in Caris Hips.	43
3.4	Beispiel der falsch berechneten MINS-Position	44
3.5	Wasserschallprofile der angewendeten CTD-Profile	46
3.6	HDCS-Subset vor der Tiefenbereinigung	48
3.7	Dialogfenster zum Festlegen des <i>Classification Levels</i> in HDCS	50
3.8	HDCS-Subset nach der Tiefenbereinigung	51
3.9	Schematische Darstellung des IDW-Interpolationsverfahrens	53
3.10	Histogramm zur Verteilung der Hangneigung	55
3.11	Vergleich der Isolinien des ungeglätteten geglätteten Geländemodells . .	56
3.12	Darstellungen zur Untersuchung des geglätteten DGMs	57
3.13	Histogramm zur Verteilung der empirischen Standardabweichung	60
3.14	Farbcodierte Darstellung der empirischen Standardabweichungen	60
3.15	Nach morphologischen Gesichtspunkten interpolierte Isolinien	62
3.16	Übersichtsdarstellung des ungeglätteten DGM in <i>Fledermaus</i>	63
3.17	3D-Ansicht der beiden vermuteten Epizentren	64
3.18	Vergleichende 3D-Ansicht des ungeglätteten und geglätteten DGMs . .	65
4.1	Darstellung der drei verschiedenen Plotmöglichkeiten in SeNT	71
4.2	Interpolationsmöglichkeiten innerhalb der SeNT-Software.	73

4.3	Dialogfeld für die seismische Filterung der Parasounddaten in SeNT . .	75
4.4	Beispiel der in SeNT gefilterten Seismogramm-Darstellungen	76
4.5	Beispiel des manuellen Verschieben der Tiefenfenster eines Parasound-Profils	78
5.1	In Fledermaus eingehängtes Parasound-Seismogramm	81
5.2	In Fledermaus eingehängte Parasound-Seismogramme mit Transparenz	82
5.3	Mit <i>mkvcurtain</i> in Fledermaus eingehängte Parasound-Seismogramme .	84
5.4	Nach <i>Pixel pro Spur</i> in Fledermaus eingehängtes Parasound-Profil . . .	85
5.5	Vergleich der Seismogramme hinsichtlich der Bildauflösung	87
6.1	Beispiel eines Parasound-Profils einer Mischform des deutlichen Ia -Typs und hyperbolischen Echos.	90
6.2	Beispiel eines Seismogrammes des Echotyps IIa	91
6.3	Beispiel des nur selten auftretenden Echotyps IIb	92
6.4	Beispiel für multiple hyperbolische Echos im Sohlenbereich eines Canyons	93
6.5	Komplette Gradierung einer idealen Turbiditlage	94
6.6	Darstellung einer Sedimentwelle aus Fledermaus	95
6.7	Turbiditlage im Talsohlenbereich eines Canyons	96

Tabellenverzeichnis

2.1	Technische Spezifikation des Hydrosweep-DS2	22
2.2	Technische Spezifikation des Parasound	26
2.3	Registrierparameter für den Normalbetrieb des Parasound-Systems . .	30
2.4	Registrierparameter für den Pilottonbetrieb des Parasound-Systems . .	32
2.5	Navigationsrelevante Sensoren und Systeme auf FS ‘Polarstern’	33
3.1	Fehlereinflüsse einer Fächerlotmessung	40
3.2	Parameter für die <i>Auto Classification</i> in HDCS	50
3.3	Parameter für die Berechnung mit der IDW-Methode	54
3.4	Einteilung des Arbeitsgebietes in Hangneigungsklassen	56
4.1	Ausgewählte Headereinträge der navigationsbereinigten Parasound-Daten	74

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Allgemeine Einleitung

Die Topographie des Meeresbodens gehört zu den zentralen Basisinformationen mariner Wissenschaften und bildet den Rahmen für viele Fragestellungen auf ozeanographischen, bio-chemischen und geowissenschaftlichen Forschungsgebiet. Anhand des Verlaufes und der morphologischen Struktur des Meeresbodens lassen sich Erkenntnisse im Zusammenhang von Strömungsvorgängen und Transportmechanismen in der Wassersäule ableiten, die mit geowissenschaftlichen Untersuchungen des Meeresbodenuntergrundes hinsichtlich Sedimentationsraten und Erosionsabläufen korrespondieren.

Für die Tiefseevermessung werden seit gut zwei Jahrzehnten Fächersonarsysteme eingesetzt, die sich als eine effiziente flächenhafte Erfassungsmethode etabliert haben. Durch eine systematische Vermessung läßt sich aufgrund der höheren Punktdichte gegenüber herkömmlicher Singlebeam-Systeme die Meeresbodentopographie eines Gebietes mittels der in ein digitales Geländemodell eingeflossenen prozessierten Tiefendaten hochauflösend abbilden. In Verbindung mit hydroakustischen Messungen der oberen Sedimentschichten des Meeresbodens und Erkenntnissen des Strömungsverhaltens in der Wassersäule können so umfassende Untersuchungen hinsichtlich der Sedimentationsprozesse in marinen Gebieten durchgeführt werden.

1.2 Das seismologische Netzwerk an der Neumayer Station

Während der Expedition ANT XIX-2 des eisbrechenden Versorgungs- und Polarforschungsschiffes 'Polarstern' im Dezember 2001 wurde nahe der Schelfeiskante des Fimbul- Ice-Shelfs (norwegisch: Fimbulisen - siehe Abbildung 1.1) im Einflussbereich des Jutulstraumen Gletschers eine systematische Vermessung durchgeführt. Zum Einsatz kam das Hydrosweep-Fächersonarsystem für eine flächenhafte Erfassung des Meeresbodens und das Parasound-Sedimentecholot, mit dem Strukturen der obersten Schichten des Meeresgrundes erfasst werden können.

Anlass für diese kurzfristig eingeplante Anfahrt in das Gebiet am Kontinentalhang des 'Dronning Maud Land' ergab sich aus der zeitgleichen Auswertung von Daten des seismologischen Netzwerkes an der deutschen Überwinterungsstation Neumayer aus dem Juli des Jahres 2000.

Dieses Netzwerk besteht aus vier separaten Beobachtungsstationen, von denen eine (VNA¹) sich auf dem fließenden Ekström Schelfeis bei der Neumayer Station (70°39.7'S, 8°15.4'W) befindet. Zwei weitere seismologische Stationen (VNA2 und VNA3) sind in ca. 40 km Entfernung in südöstlicher Richtung bzw. ca. 80 km in südwestlicher Richtung an Orten positioniert, wo die Eismassen, welche den größten Teil (mehr als 95 % der Fläche) des antarktischen Kontinents mit einer Mächtigkeit von durchschnittlich 2000 m bis maximal 4000 m bedecken, auf dem Kontinent aufliegen. Diese Gebiete der Antarktis mit aufliegenden Eismassen werden als 'Grounded Ice' bezeichnet.

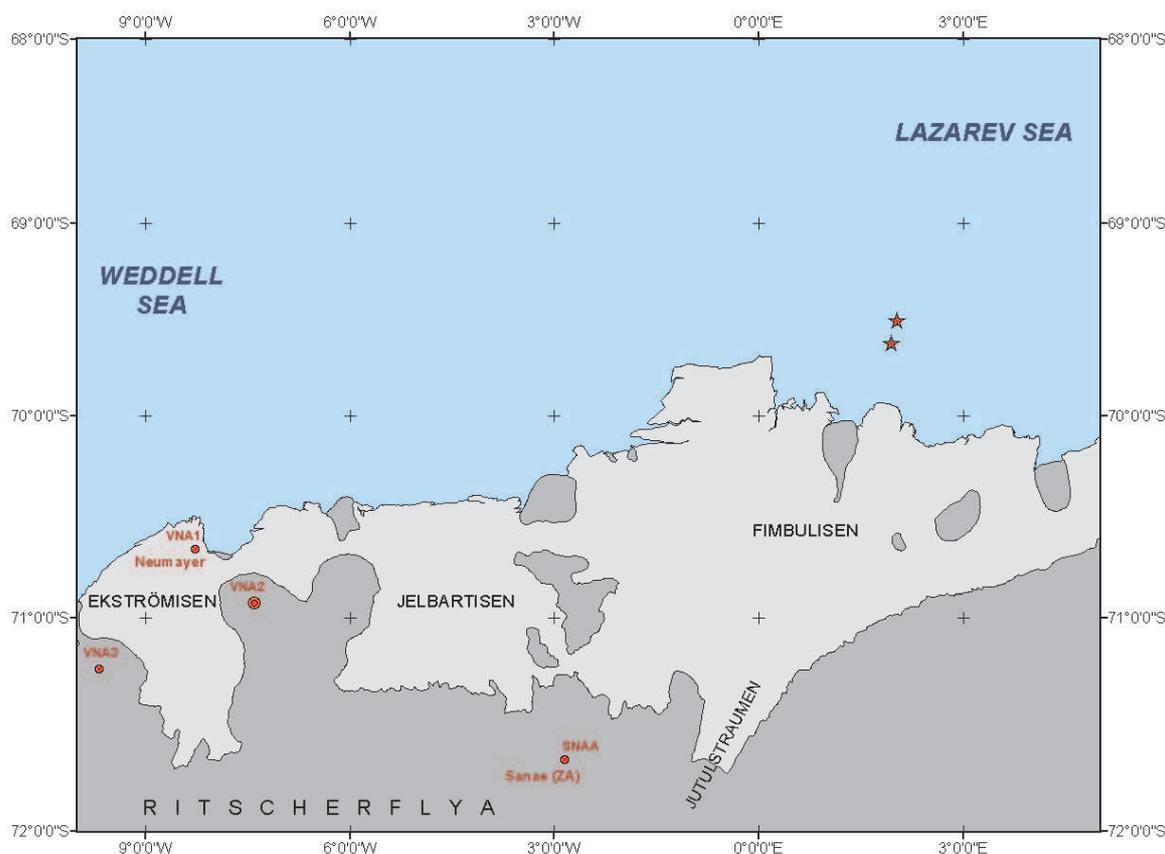


Abbildung 1.1: Darstellung des seismologischen Netzwerkes an der Neumayer Station und die Epizentren (Sterne) der beiden detektierten seismologischen Ereignisse des 22. Juli 2000.

In 230 km Entfernung ist der vierte Seismograph (SNAA²) des seismologischen Netzes nahe der weiter östlich gelegenen südafrikanischen Antarktisstation Sanae IV (71°40.3'S, 2°50.3'W) auf festen Untergrund (Fels) installiert. Diese vier Stationen wurden vom Al-

¹Die Abkürzung VNA steht für: von Neumayer Antarktis. Dies ist der offizielle Stationsname, der in Anlehnung an die erste deutsche Überwinterungsstation 'Georg von Neumayer' vom 'International Seismological Centre' (ISC) vergeben wurde.

²SNAA ist die vom ISC vergebene offizielle Bezeichnung für Sanae Antarktis.

fred Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) eingerichtet und werden durch dieses auch technisch betreut.

Zentraler Bestandteil dieses Netzes seismologischer Beobachtungsstationen ist das VNA2 Array, welches aus 16 einzelnen Sensoren besteht, die in drei konzentrischen Kreisen mit einem maximalen Durchmesser von 2 km angeordnet sind. Über eine solche Anordnung können auftretende seismologische Signale neben der Analyse ihrer Struktur auch hinsichtlich der Ausbreitungsgeschwindigkeit und Ausbreitungsrichtung eingeordnet bzw. charakterisiert und bei stärkeren kurzzeitigen Ereignissen sogar deren mögliche Ausgangsquelle lokalisiert werden.

Diese Eigenschaften lassen sich ebenso auf die Anordnung der vier separaten seismologischen Stationen übertragen. Die größere Dimensionierung dieser Messanordnung läßt ein größeres Zeitfenster zur Beobachtung von sich ausbreitenden seismologischen Wellen zu. Die dezentrale Struktur der Messsensorik trägt dazu bei, mögliche regionale Fehlereinflüsse zu detektieren, so dass diese bei der anschließenden Interpretation der Aufzeichnungen berücksichtigt werden können.

Im internationalen Rahmen können durch ein Verbundnetz seismologischer Beobachtungsstationen rund um den Globus Erschütterungen und Vibrationen des Erdkörpers detektiert und geortet werden. Durch ein solches Monitoring lassen sich Rückschlüsse auf anstehende Naturereignisse wie z.B. Erdbeben oder vulkanische Aktivitäten ziehen, und es trägt so dazu bei, ein Frühwarnsystem im Rahmen des Katastrophenschutzes zu etablieren.

Nicht nur geologische Vorgänge in der Erdkruste rufen seismologische Schwingungen im Frequenzbereich von ca. 10 Hz bis hin zu einigen Millihertz hervor, sondern auch von Menschen angeregte Ereignisse wie beispielsweise die Explosionswellen eines Kernwaffentests. Somit eignet sich ein solches weltweites Netzwerk von seismologischen Beobachtungsstationen auch zur Überwachung des *Kernwaffenteststoppabkommens* (CTBT - Comprehensive Nuclear Test-Ban Treaty), welches im September 1996 von der UN initiiert wurde. Zur Überwachung der Einhaltung dieses Abkommens ist ein 'International Monitoring System' (IMS) bestehend aus insgesamt 321 seismologischen, hydroakustischen, Infraschall- oder Radionuklid-Messstationen im Aufbau, welches sich über den ganzen Globus erstrecken soll. Über das gemeinsame Erheben und die zentrale Auswertung dieser Daten sollen Verstöße gegen das CTBT aufgedeckt und lokalisiert werden. Aufgrund der besonderen geographischen Lage ist gerade auch die Stationierung solcher Beobachtungsstationen auf dem antarktischen Kontinent von großen Interesse.

Die deutsche Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) mit Sitz in Hannover betreibt in Kooperation mit dem AWI zwei dieser ins IMS eingebundenen Monitoring-Stationen in der Antarktis. Zum einen ist dies die Beobachtungsstation SNAA des seismologischen Neumayer-Netzwerkes. Zum anderen wurde im antarktischen Sommer 2002/2003 mit dem Aufbau einer Infraschall-Messanlage direkt bei der deutschen Neumayer Station begonnen. Mit Hilfe von hochempfindlichen Mikrobarographen,

die in Form einer Spirale mit einem Durchmesser von 2 km angeordnet sind, sollen niederfrequente Schallwellen mit Frequenzen kleiner als 20 Hz (Infraschall) detektiert werden. Diese niederfrequenten Wellen, die z. B. bei Vulkaneruptionen, Explosionen und Meteoriteneintritten in der Atmosphäre entstehen, können sich über große Entfernungen bis zu mehreren tausend Kilometern ausbreiten.

Am 31. Januar 2003 konnten die ersten Aufzeichnungen der bei der Neumayer-Station neu eingerichteten Infraschall-Messstation (IS-27) per Satellitenverbindung an das nationale Datenzentrum der BGR übertragen werden, von wo sie dann an das ‘International Data Centre’ (IDC) in Wien zur gemeinsamen Auswertung der Daten des IMS weiterleitet werden (BGR, 2003).

Das langfristige internationale Interesse am Betreiben der IS-27 hatte auch begünstigende Effekte für die Entscheidungsfindung hinsichtlich der Finanzierung und Planung einer neuen Überwinterungsstation Neumayer III, deren erste vorbereitende Messungen bereits während der derzeitigen Sommerkampagne 2003/04 anlaufen.

Bei der während der Expedition ANT XIX-2 am AWI in Bremerhaven durchgeführten Prozessierung der seismologischen Aufzeichnungen aus dem Juli 2000 zeigten sich markante Ereignisse und Muster, die in einer Zeitspanne von ca. 16 Stunden mit einer besonderen Intensität ausgeprägt waren (Müller, 2003). Das langanhaltende Signalspektrum besaß charakteristische Eigenschaften eines Tremors. Dieser Begriff kommt aus dem Englischen und bedeutet ‘Zittern’, ‘Beben’. Im geologischen Sinne werden damit leichte, kontinuierlich andauernde Erdbebentätigkeiten bezeichnet, die durch Magmenbewegungen im Untergrund hervorgerufen werden. Häufig sind sie ein Indiz für einen bevorstehenden Vulkanausbruch und wurden beispielsweise bei der Eruption des Mount St. Helens (Bundesstaat Washington, USA) im Mai 1980 beobachtet.

Der Signalverlauf ist durch ein langsames Anschwellen einer niederfrequenten Grundschwingung (kleiner 1 Hz), die in Intensität und Frequenz zeitlich variieren kann, mit einem Spektralband harmonischer Schwingungen mit Frequenzen ganzzahliger Vielfacher der Grundfrequenz gekennzeichnet. Durch diesen gleitenden Verlauf ist es schwierig, Ausgangsquellen eines vulkanischen Tremors zu lokalisieren.

Diesem von allen vier seismologischen Stationen registrierten langanhaltenden Tremorsignal gingen zwei starke, innerhalb von drei Minuten aufeinanderfolgende Signale voraus, die als lokale Erdbeben interpretiert wurden und mit möglichen submarinen Rutschungen in Zusammenhang stehen könnten. Deren Epizentren³ konnten aufgrund des kurzzeitigen Anschwellen der Signalstärke in 40 km seeseitiger Entfernung von der Schelfeiskante des Fimbulisen mit einer Fehlerellipse von ca. 6 km bei 69.626° S/1.957° E und 69.513° S/2.038° E geortet werden (siehe Abbildung 1.1).

³Mit Epizentrum wird der Ausgangspunkt eines Erdbebens bezogen auf die Erdoberfläche bezeichnet, welcher lotrecht über dem wahren dreidimensionalen Erdbebenherd (Hypozentrum) im Erdinnern liegt.

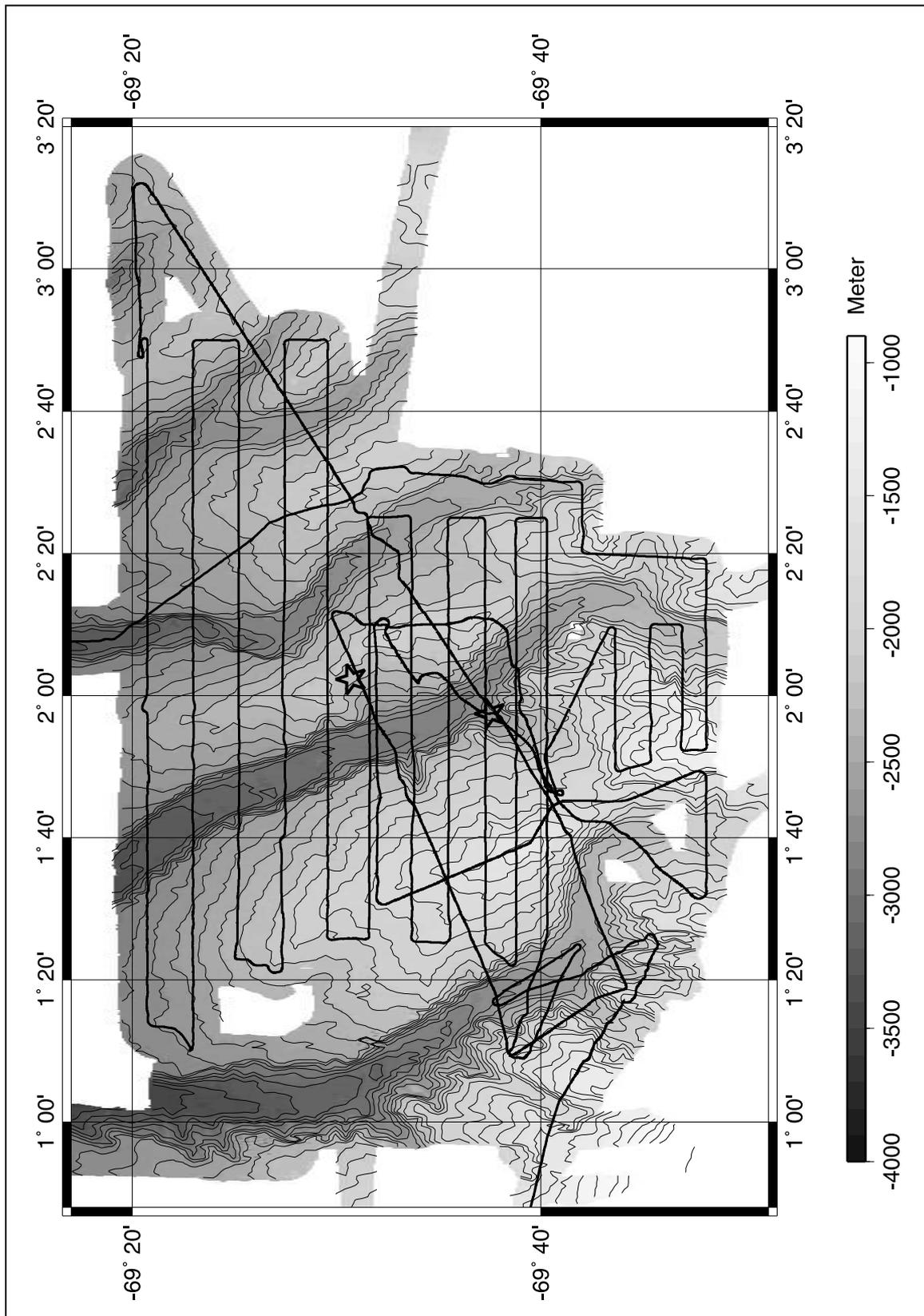


Abbildung 1.2: Isoliniendarstellung des Untersuchungsgebietes mit Tracklinien der ANT XIX-2 und Markierung der Epizentren der vermuteten Erdbeben (Krocker, 2003)

1.3 Das Untersuchungsgebiet

Um diese aus den seismologischen Aufzeichnungen gezogenen Schlüsse mit Erkenntnissen aus anderen Quellen hinterlegen zu können, bedurfte es weiterer Untersuchungen. Aufgrund der für eine solche Fragestellung prädestinierten wissenschaftlichen Ausrichtung (Geophysik, Geologie, Bathymetrie) der Forschungsfahrt ANT XIX-2 und extremer Eisverhältnisse in dem ursprünglich vorgesehenen Messgebiet des Fahrtabschnittes konnten diese weiterführenden Untersuchungen zeitnah zwischen dem 23. und 27. Dezember 2001 durchgeführt werden.

Zu Beginn ist in dem Untersuchungsgebiet für die Erfassung der Morphologie des Meeresboden eine systematische bathymetrische Vermessung durchgeführt worden. Die parallel dazu stattfindenden Messungen des Parasound-Sedimentecholotes sollten erste Erkenntnisse über den Aufbau der oberen Schichten des Meeresbodens ergeben, um evtl. schon Hinweise auf mögliche Hangrutschungen zu erhalten. Anschließend sind am 25. und 26. Dezember zehn im Gebiet der vermuteten Erdbebenaktivitäten gelegene Profile Mehrkanalseismik mit einer Gesamtlänge von 250 km gemessen worden.

Aus diesen Messungen ergaben sich folgende Vorergebnisse. Es konnten keine Erkenntnisse dafür gewonnen werden, dass die registrierten Erdbeben auf vulkanische Aktivitäten zurückzuführen sind oder marine Hangrutschungen ausgelöst haben.

Wie die Abbildung 1.2 zeigt, zeichnet sich das Gebiet durch sehr stark ausgeprägte Grabenstrukturen aus, die durch Strömungen des am Schelfeisrand gebildete, absinkende Tiefenwassers ausgehend vom Kontinentalschelf in nördlicher Richtung in die Tiefsee hervorgebracht wurden. Die mit Sternen markierten Positionen symbolisieren die beiden Bereiche, wo die als Erdbeben gedeuteten starken seismologischen Signale zurückgeführt wurden.

Aus den bathymetrischen Daten lassen sich anhand der Gestalt des Meeresbodens im Bereich eines Epizentrums zwar mögliche Hinweise für eine submarine Rutschung ableiten (Calcara & Jokat, 2003), diese kann aber nicht durch die Messungen der oberen Sedimentschichten mit Hilfe des Parasound-Systems belegt werden. Die Seismogramme mit Eindringungen von maximal 20 m zeigen meist nur einen starken Reflektor, der auf einen kontinuierlichen Abtransport und Verfestigung von Sedimente schließen läßt. Es sind keine Anzeichen für Umschichtungen, die auf plötzlich eingetretende Ereignisse zurück zu führen wären, aus den Daten ersichtlich (Niemann, 2003b).

Auch die Profile der Reflexionsseismik zeigen keine starken Störungen in den tieferen Sedimentstrukturen, welche Rückschlüsse auf die starken seismologischen Ereignisse aus dem Juli 2000 zulassen. Vielmehr bestätigt sich eine strömungskontrollierte Ablagerung von Sedimenten zwischen den Gräben, die eine Mächtigkeit von bis zu 2000 m besitzen (Calcara & Jokat, 2003).

1.4 Zielsetzung

Die Daten des Hydrosweep-Fächersonarsystems sind für die Berechnung eines hochgenauen digitalen Geländemodells, welches die Grundlage für die Herstellung einer bathymetrischen Karte darstellt, aufzubereiten. In diesem Zusammenhang müssen die Tiefenmessungen einer Überprüfung und zumeist auch einer Datenbereinigung unterzogen werden, sowie der Bezug zur Position und Lage (Heading, Pitch, Roll, Heave) des Schiffes hergestellt werden (Schenke, 1993).

Das Messprinzip des parametrischen Sedimentecholotes Parasound ist eingehend darzulegen und dessen seismischen Aufzeichnungen für die anschließende georeferenzierte Darstellung aufzuarbeiten und zu visualisieren.

Durch das gemeinsame Prozessieren der bathymetrischen und seismischen Daten der beiden an Bord von FS 'Polarstern' installierten Echolotsysteme Hydrosweep und Parasound ergeben sich Möglichkeiten deren Ergebnisse auch hinsichtlich eines besseren Verständnisses zusammen darzustellen. Zu diesem Zweck sollen Lösungswege aufgezeigt werden, die mit einem am AWI verfügbaren Visualisierungsprogramm realisiert werden können.

Die einzelnen Arbeitsschritte und die bei der Prozessierung auftretenden Probleme sind verständlich darzustellen. Die Ergebnisse können abschließend hinsichtlich des ursprünglichen Untersuchungsgrundes des Messgebietes betrachtet und interpretiert werden.

2 Grundlagen und Anwendungen hydroakustischer Messverfahren

2.1 Einführung in die Hydroakustik

Die Hydroakustik beschäftigt sich mit der Ausbreitung von Schallwellen in flüssigen Medien, insbesondere im Wasserkörper der Meere, und beschreibt die dabei auftretenden Phänomene. So bilden die Erkenntnisse auf diesem Gebiet die Grundlagen für die praktische Anwendung von Echolotsystemen und berühren somit auch viele Aspekte der akustischen Sedimentechographie. Diese reichen von der akustischen Schallerzeugung über die räumliche Ausbreitung von Schallwellen in homogenen sowie inhomogenen Flüssigkeiten bis hin zu ihrer Dämpfung beim Durchdringen des Mediums und schließlich deren Reflexion, Streuung und Brechung an Grenzflächen. In diesem Kapitel soll hauptsächlich auf die Aspekte eingegangen werden, welche für die Betrachtung von Echoloten im Allgemeinen und dem Sedimentecholot im Besonderen von Interesse sind.

2.2 Erzeugung und Ausbreitung von Schallwellen

Schall breitet sich als Dichtestörung durch Druck- und Volumenänderung in einem Medium aus. In Gasen und Flüssigkeiten führen die Materieteilchen longitudinale Schwingungen um ihre Ruhelage parallel zur Ausbreitungsrichtung aus. Bei dem hier betrachteten hydroakustischen Fall wird durch eine Schallquelle die Dichte in deren Umgebung kontrolliert verändert. In isotropen Medien breiten sich die Störungen einer singulären Schallquelle mit konstanter Geschwindigkeit kugelförmig aus.

Anschaulich läßt sich die wellenförmige Ausbreitung einer so emittierten Störung mit Hilfe des *Huygens'schen* Prinzips beschreiben. Ausgehend von dem Signalzentrum bilden alle Orte gleicher Phase eine sogenannte Wellenfront. Unter der Annahme, dass in jedem Punkt dieser Front ein Streuzentrum sitzt, von dem wieder eine Kugelwelle ausgeht, kann dann eine neue Wellenfront als Einhüllende dieser neuen Elementarwellen konstruiert werden. In Abbildung 2.1 sind die Wellenfronten der ersten drei Zeitschritte eines linearen Schallgebers schematisch dargestellt. Während im Zentralbereich die Länge der ebenen Wellenfront und der Schalldruck im Idealfall konstant bleiben, nimmt die Länge im Außenbereich zu und damit auch die Signalamplitude mit der Zeit ab. In der Praxis wird im Fernfeld von einem solchen Schallgeber im wesentlichen eine gekrümmte Kugelwelle in einem Kegelausschnitt abgestrahlt.

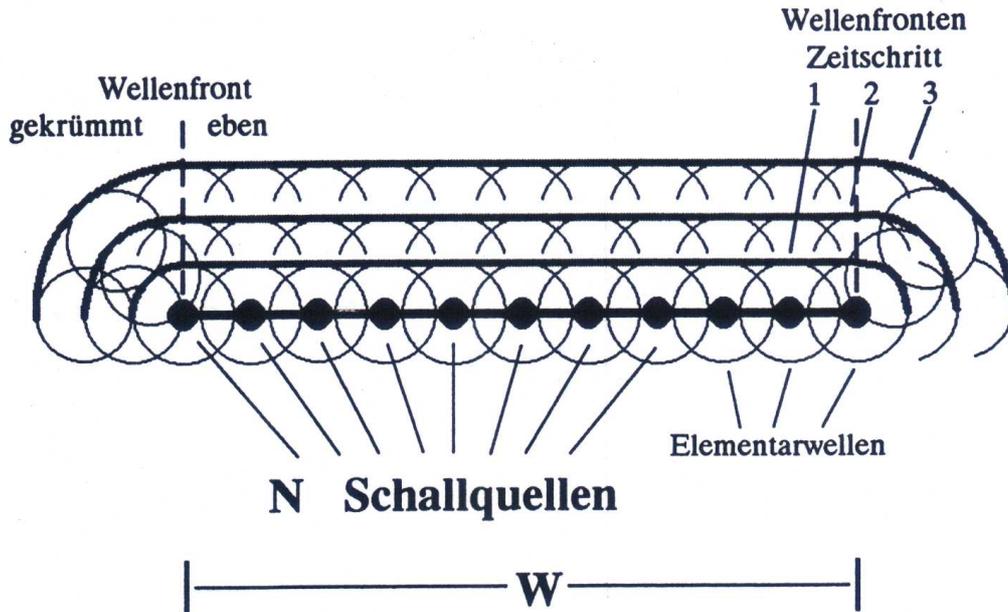


Abbildung 2.1: Aufbau von Wellenfronten nach dem *Huygens'schen* Prinzip. Schematische Darstellung von N Schallquellen, die entlang einer Linie mit der Länge W aquidistant angeordnet sind (Spieß, 1993)

Solange keine Energieverluste im Medium auftreten, wäre die durch eine solche Fläche abgestrahlte Gesamtleistung zu jeder Zeit und in jeder Entfernung gleich. Um Leistungen verschiedener Echolotsysteme miteinander vergleichen zu können, werden Druckamplituden üblicherweise nicht als Absolutwerte angegeben sondern auf Referenzwerte bezogen. Dabei werden üblicherweise 1 Pa bzw. $1 \mu\text{Pa}$ für den Druck und 1 m für die Referenzentfernung R_0 benutzt. Für die Betrachtung einer Punktquelle ist die Referenzschalldruckamplitude

$$P_0 = \sqrt{\frac{\Pi \rho c_0}{4\pi R_0^2}} \quad (2.1)$$

in einer Referenzentfernung R_0 abhängig von der abgegeben Leistung Π , der Dichte ρ und der Schallgeschwindigkeit c_0 des Ausbreitungsmediums ab. Wegen der Erhaltung der Gesamtenergie auf der Oberfläche der Wellenfront nimmt die Schalldruckamplitude P mit dem Abstand ab. Sie ist umgekehrt proportional zum Abstand R vom Zentrum

$$P = \frac{P_0 R_0}{R} \quad (2.2)$$

Bei der Schallausbreitung im Wasser treten somit geometrische Verluste (Divergenz) auf, die zu einer weiteren Amplitudenabnahme führen. Die dadurch bedingten Transmissionsverluste TL im Abstand R werden auf einer logarithmischen Skala in dB angegeben und errechnen sich durch Differenzbildung zwischen dem aktuellen Druckwert

P_r und der Quellstärke P_0

$$TL = 20 \log_{10} \frac{P_0}{P_r} - 20 \log_{10} \frac{R}{R_0}. \quad (2.3)$$

Bei einer Verdopplung der Entfernung nimmt die Schallstärke um etwa 6 dB ab. Beispielsweise ist in einer Entfernung von 100 m die Amplitude um 40 dB, bei 1000 m um 60 dB und bei 5000 m um 74 dB geringer als in der Referenzentfernung 1 m (Spieß, 1993).

Neben der geometrische Amplitudenabnahme kommt es vor allem durch die mit der Viskosität des Ausbreitungsmediums verbundene physikalische Dämpfung (Absorption) zu einer zusätzlichen Verringerung der Amplituden.

Der Dämpfungskoeffizient α von Meerwasser ist von der Frequenz, der Temperatur (T), der Salinität (S) und dem hydrostatischen Druck (p_s) abhängig (Medwin & Clay, 1998). Abschätzungen von Medwin und Clay für den gesamten Energieverlust bei der Schallausbreitung in Meerwasser zeigen aber deutlich, dass die Schallabsorption im Wasser erheblich geringer ist als die Verluste durch die sphärische Divergenz der Welle. Beispielsweise beträgt für eine Senderfrequenz $f = 4$ kHz bei 14°C und 35 psu Salzgehalt der Dämpfungskoeffizient α etwa 2.4×10^{-4} dB/m und führt somit in 100 m Entfernung zu einer Abnahme der Amplitude um 0.02 dB, in 1000 m um 0.2 dB und in 5000 m um 1.2 dB.

Für ein Echolot mit einer 18 kHz Frequenz wächst die Absorption um eine Zehnerpotenz mit $\alpha = 2.3 \times 10^{-3}$, so dass die Amplitudenabnahme entsprechend 0.2 dB, 2.3 dB und 12 dB beträgt. Unter Berücksichtigung der Divergenz und Absorption nimmt auch die Schallintensität I mit zunehmender Entfernung von der Quelle ab. Für die Schallintensität im Abstand R relativ zur Entfernung R_0 gilt:

$$I_r = I_0 \frac{R_0^n}{R} 10^{-\alpha(R-R_0)/10}, \quad (2.4)$$

mit $n = 0$ für ebene Wellen,
 $n = 1$ für Zylinderwellen,
 $n = 2$ für Kugelwellen,
 $\alpha =$ Dämpfungskoeffizient von Meerwasser [dB/m].

Wie die Energieabsorption ist auch die Schallgeschwindigkeit von den physikalischen Eigenschaften des Wassers abhängig. Da sich über sie und die gemessene Laufzeit zwischen dem Aussenden des Sendeimpulses und dem Empfang des Reflexionssignals vom Meeresboden dessen Tiefe ergibt, kommt ihr eine besondere Bedeutung zu. Zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit c_0 im Meerwasser in m/s wurde beispielsweise von Medwin (1975) die folgende vereinfachte Gleichung abgeleitet.

$$c_0 = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.010T)(S - 35) + 0.016z, \quad (2.5)$$

mit $z =$ Tiefe in Metern.

Da Temperatur (T) und Salinität (S) des Meerwassers neben lokalen und regionalen auch ausgeprägte saisonale und kurzfristigere Variabilitäten aufweisen, ergeben sich daraus erhebliche Unterschiede bei der Geschwindigkeit der Schallausbreitung. Dabei kann sich die Schallgeschwindigkeit bei konstanter Temperatur und Salzgehalt allein durch die Zunahme der Wassertiefe um 5000 m bis zu 80 m/s erhöhen. Eine Zunahme ähnlicher Größenordnung würde ein Temperaturanstieg von 0°C auf 30°C bewirken, wobei sich Variationen in der Salinität in geringerem Ausmaß bemerkbar machen (Spieß, 1993). Somit ist davon auszugehen, dass sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle räumlich ändert, wodurch es zusätzlich zu Reflexion, Beugung und Brechung kommt (Vogel, 1997).

2.3 Richtcharakteristik von Schallgebern

Zur Schallerzeugung muss mechanische Energie aufgebracht werden, um die Mediumsteilchen aus ihrer Ruhelage zu bewegen. Zu diesem Zweck werden meist elektroakustische Wasserschallwandler benutzt, die unter Nutzung des piezoelektrischen Effektes aus freigesetzten Spannungen eines anliegenden elektrischen Feldes eine mechanische Verformung des Wandlers hervorrufen. Wird ein piezoelektrischer Körper durch Druckwellen des Mediums zu Schwingungen angeregt, werden dadurch proportional zur Auslenkung der Strahlfläche des Körpers eine elektrische Spannung am Ausgang des elektrischen Teils des Wandlers erzeugt (Urban, 2002). Ist der Transducer⁴ sowohl zum Senden als auch zum Empfang geeignet, wird er als reversibel bezeichnet. Viele kristalline Materialien haben piezoelektrische Eigenschaften, wie z. B. Quarz, bei dem die mechanische Verformung in Richtung des elektrischen Feldes erfolgt und als longitudinaler Piezoeffekt bezeichnet wird (Urban, 2002).

Wird anstelle einer punktförmigen Schallquelle von mehreren Quellen gleicher Amplitude und Phase ausgegangen, überlagern sich die einzelnen kugelsymmetrisch abgestrahlten Elementarwellen jedes Zeitabschnittes. Sind diese Quellen nun in einer Linie oder gar in einer ebenen Fläche angeordnet, so werden durch Überlagerung zylindrische bzw. ebene Wellenfronten erzeugt. Die Wandlerabmessungen beeinflussen neben der Sendefrequenz auch dessen Richtcharakteristik und somit auch die Winkelauflösung des empfangenen Echsignals. Die Richtcharakteristik $D(\theta, \phi)$ ist eine Funktion der sphärischen Winkel θ , ϕ und gibt die auf die akustische Hauptstrahlrichtung normierte Winkelabhängigkeit des Schalldrucks an (siehe Abbildung 2.2).

Abhängig von der Geometrie der Wandlerfläche erhält man für einen aus einzelnen Elementarwandlern zusammengesetzten, rechtwinkligen Wandler folgende Richtcharakteristik (Bergmann, 1995):

$$D(\theta, \phi) = \frac{\sin \frac{\pi \cdot a}{\lambda} \sin \theta}{\frac{\pi \cdot a}{\lambda} \sin \theta} \cdot \frac{\sin \frac{\pi \cdot b}{\lambda} \sin \phi}{\frac{\pi \cdot b}{\lambda} \sin \phi}, \quad (2.6)$$

⁴Als Transducer werden die Sende und Empfangseinheiten von Echolotsystemen bezeichnet. Sie können auch als Wandler, Schwinger oder auch Transducerarray bezeichnet werden.

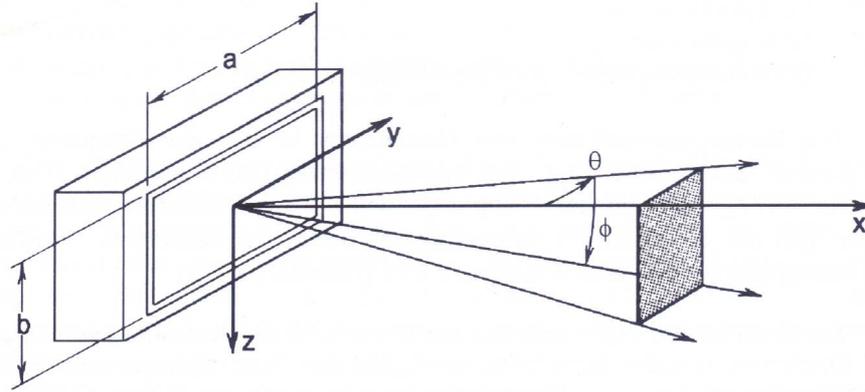


Abbildung 2.2: Geometrie eines rechteckigen Schallgebers und Definition der sphärischen Winkel (Bergmann, 1995)

mit a = Länge des Wandlers,
 b = Breite des Wandlers,
 λ = Wellenlänge.

Entscheidend für die Winkelauflösung eines Wandlers ist die Geometrie von Haupt- und Nebenmaxima der Richtcharakteristik, also das Verhältnis zwischen der sogenannten Hauptkeule und den Nebenkeulen. Abbildung 2.3 zeigt das Polardiagramm der Amplitudencharakteristik eines kreisrunden Wandlers. Wesentliche Parameter für die Beschreibung der Richtcharakteristik eines Transducers sind die Halbwertsbreite, der Öffnungswinkel und das Amplitudenverhältnis zwischen den Nebenmaxima zum Hauptmaximum. Die Halbwertsbreite θ_h ist als Winkel zwischen dem -6 dB Abfall der Hauptkeule definiert und ist abhängig vom Verhältnis der Wandlerabmessungen zur Wellenlänge des Quellsignals.

$$\theta_h = \arcsin \frac{\pi}{ka}, \quad (2.7)$$

mit a = Seitenlänge des Wandlers,
 $k = 2\pi/\lambda$.

Bei einer Seitenlänge L von 1 m lassen sich für die gängigen Echolotfrequenzen von 3.5, 12 oder 18 kHz Halbwertsbreiten von 25° , 7.1° bzw. 4.7° errechnen.

Für die Angabe der Öffnungswinkel eines Transducers werden häufig, wie auch in den folgenden Ausführungen, die Winkel angegeben, bei denen die Amplitude auf 70 % des Maximalwertes oder um 3 dB abgefallen ist. Für die aufgeführten Frequenzen liegen sie bei 21° , 6.1° und 4.1° (Spieß, 1993). Es wird ersichtlich, dass man bei kleineren Quellfrequenzen konventioneller Wandler eine gute Winkelauflösung, also einen geringen Öffnungswinkel, nur durch große Wandlerabmessungen realisieren kann und man somit schnell an einbautechnische Grenzen stößt.

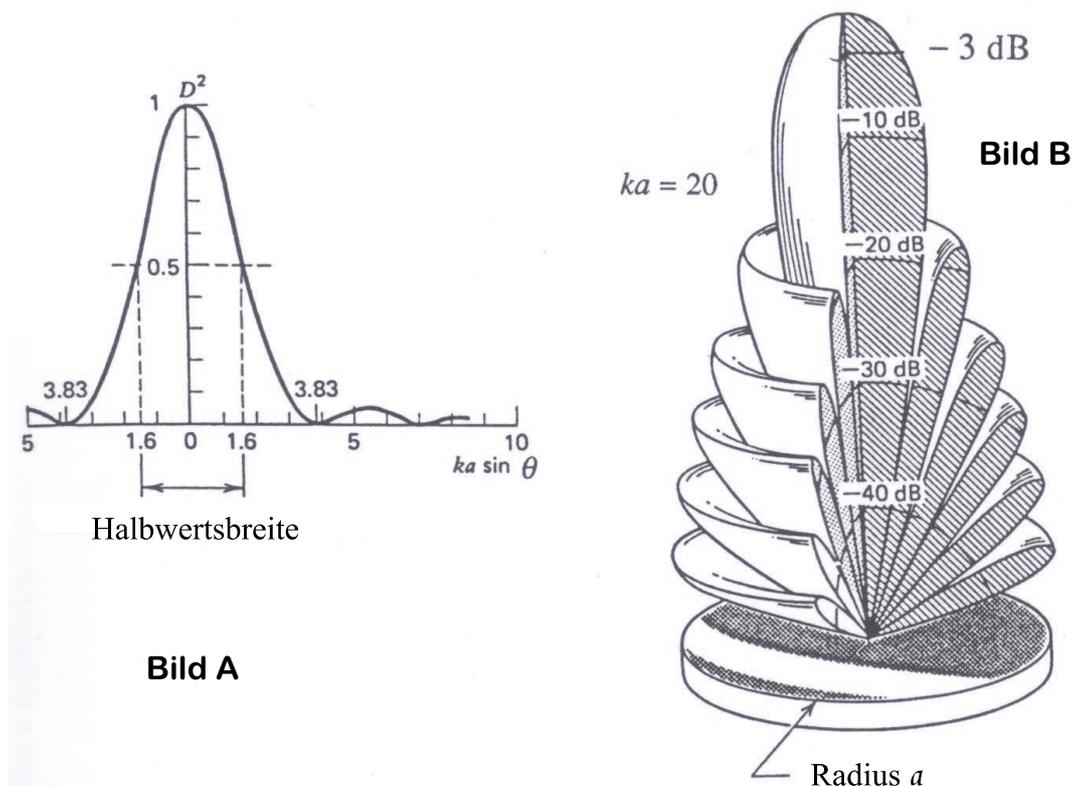


Abbildung 2.3: Richtcharakteristik D eines kreisrunden Wandlers mit dem Radius a . Linearer Graph von D^2 als Funktion von $k \cdot a \cdot \sin \theta$ (Bild A), wobei D^2 auf den Maximalwert der Hauptkeule normiert ist, und logarithmische 3D-Polardarstellung mit $ka = 20$ (Bild B). Der Winkel der Halbwertsbreite ist bei $D^2 = 0.5$ gekennzeichnet. Der Öffnungswinkel der Hauptkeule (Bild B) ist bei einem Abfall des Maximalwertes der Amplitude um 3 dB angegeben (Medwin & Clay, 1998)

Die Amplitude der ersten Nebenneule beträgt etwa 22 % der Amplitude der Hauptkeule. Dabei nimmt die Anzahl der Nebenneulen mit kürzer werdender Wellenlänge zu. Ist aber die Wellenlänge im Verhältnis zu der Ausdehnung der schallerzeugenden Fläche klein, so werden im Zentralbereich der Transducerfläche theoretisch nahezu verlustfreie ebene Wellenfronten abgestrahlt (siehe Abbildung 2.1).

Besteht der Schallgeber aus einer Gruppe von Elementen, die alle einzeln angesteuert werden können, so lässt sich durch gezieltes Verzögern des Sendepulses auch die Phasenlage jedes einzelnen Elementes kontrollieren. Damit wird erreicht, dass die Wellenfront auch mit einem Winkel – bezogen auf die Transducerfläche – θ bzw. ϕ ungleich Null ausgesendet werden kann. Bei dieser Art der Ausrichtung der Energie des Sendesignals spricht man von Strahlstabilisierung.

2.4 Nichtlineare Akustik und der parametrische Effekt

Die Relation zwischen Druck P und Dichte ρ wird durch die akustische Zustandsgleichung $p = p(\rho)$ beschrieben. Beide Größen setzen sich aus einer konstanten Komponente und einem Zusatzglied, das sich in der Welle in Abhängigkeit von Raum und Zeit ändert, zusammen

$$p = p_0 + p(x, y, z, t), \quad (2.8)$$

$$\rho = \rho_0 + \rho(x, y, z, t). \quad (2.9)$$

P_0 ist der hydrostatische Druck und ρ_0 die Dichte des Mediums für diesen Druck. Ferner wird die Ausbreitung einer Schallwelle als ein adiabatischer Prozess angenommen, so dass Temperatureffekte nicht berücksichtigt werden (Bergmann, 1995).

Mit Hilfe des *Hooke*'schen Gesetzes der elastischen Verformung

$$p = \kappa \cdot s \quad (2.10)$$

läßt sich die mittlere Druckänderung Δp bei kleinen Deformationen (hier: relative Dichteänderung $s = \Delta\rho/\rho_0$) auch näherungsweise wie folgt angeben:

$$\Delta p = \frac{\kappa}{\rho_0} \Delta\rho. \quad (2.11)$$

Die Proportionalitätskonstante ist der Kompressionsmodul κ . Aus der Bewegungsgleichung, welche die raum-zeitliche Ausbreitung einer Dichtestörung beschreibt, ergibt sich die Verknüpfung der Schallgeschwindigkeit c_0 mit den elastischen Eigenschaften des Mediums:

$$c_0^2 = \frac{\delta p}{\delta \rho} = \frac{\kappa}{\rho_0}. \quad (2.12)$$

Die Geschwindigkeit, mit der sich ein Schallsignal ausbreitet, ist somit von dem Druck, der Dichte und der Kompressibilität des Mediums abhängig.

Dabei wird angenommen, dass eine plötzliche Änderung des Druckes unmittelbar eine proportionale Dichteänderung hervorruft. Für kleine Dichteänderungen kann die Zustandsgleichung in einer Taylor-Reihe nach Potenzen von $\Delta\rho$ entwickelt werden

$$p = p_0 + \left[\frac{dp}{d\rho}\right]_{\rho=\rho_0} \cdot \Delta\rho + \left[\frac{d^2p}{d\rho^2}\right]_{\rho=\rho_0} \cdot \Delta\rho^2 \quad (2.13)$$

oder nach Potenzen der relativen Kompression $s = \frac{\Delta\rho}{\rho_0}$

$$p = \underbrace{\rho_0 \cdot \left[\frac{dp}{d\rho}\right]_{\rho=\rho_0}}_{\kappa} \cdot s + \underbrace{\frac{\rho_0^2}{2} \left[\frac{d^2p}{d\rho^2}\right]_{\rho=\rho_0}}_{B/2} \cdot s^2 \quad (2.14)$$

dargestellt werden.

Der Koeffizient des linearen Gliedes der Kompression s (Gleichung 2.14) repräsentiert den linearen Modul der Volumenelastizität, den Kompressionsmodul κ . Der entsprechende Koeffizient für s^2 ist der nichtlineare Modul der Volumenelastizität B und hat die Dimension eines Druckes (Bergmann, 1995).

Für den Fall infinitesimaler Anregung können die quadratischen Glieder vernachlässigt werden, so dass sich für die Zustandsgleichung annähernd Gleichung 2.10 ergibt.

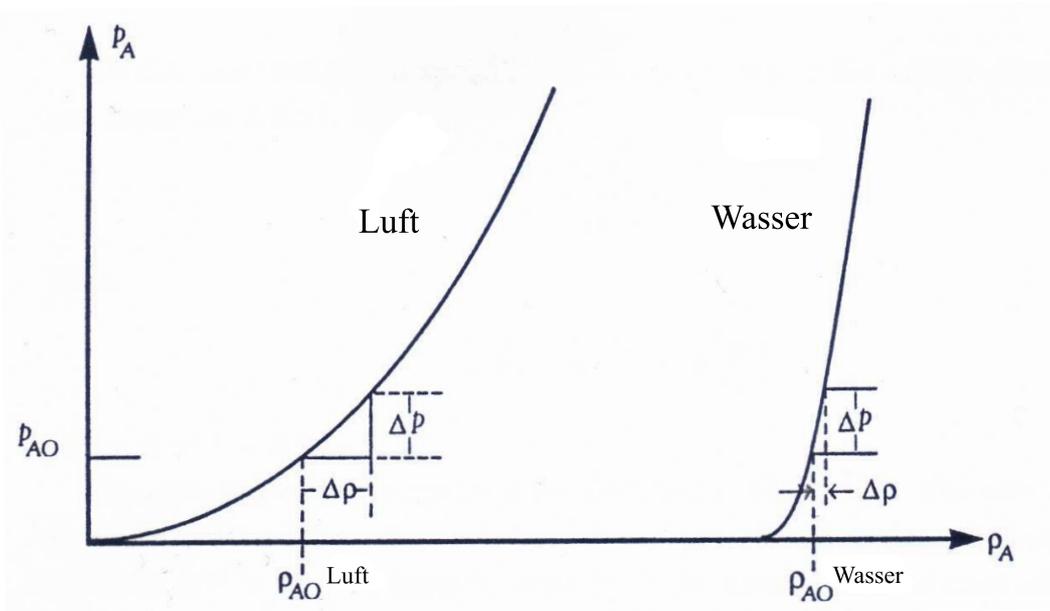


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der Zustandsgleichung (Abhängigkeit des Druckes von der Dichte $p = p(\rho)$) für Luft und Wasser. Die beiden Kurven sind nicht skaliert. Die große Steigung der Kurve für Wasser (etwa 23 mal größer als bei Luft) unterstreicht dessen Inkompressibilität (Medwin & Clay, 1998).

Alle bisherigen, die Ausbreitung von Schallwellen betreffenden Überlegungen gelten nur für Wellen kleiner Amplitude, d. h. für Wellen, bei denen die Druckamplitude klein ist gegenüber dem mittleren Druck, die Verdichtung klein gegenüber der mittleren Dichte, die mittlere Schallausbreitungsgeschwindigkeit klein gegenüber der Schall-(Phasen)-Geschwindigkeit und die Verrückung der Teilchen klein gegenüber der Wellenlänge. Wenn dies nicht der Fall ist, treten viel kompliziertere, mathematisch nur in Sonderfällen exakt zu beschreibende Verhältnisse ein (Vogel, 1997).

In Abbildung 2.4 sind die Kennlinien der Zustandsgleichungen für Luft und Wasser skizziert. Sie zeigen eine deutliche Nichtlinearität in der dichteabhängigen Steigung der Kurve $\Delta p/\Delta\rho$, dem Quadrat der momentanen Geschwindigkeit c_m (aus Gleichung 2.12). Für Schallwellen mit infinitesimalen Amplituden ist die Betrachtung der linearen Komponente der Reihenentwicklungen 2.14 ausreichend, da die momentane Schallgeschwin-

digkeit c_m zu allen Zeiten der allgemeinen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle c_0 entspricht. Bei einer großen Dichtestörung kann die Nichtlinearität der Kurve der Zustandsgleichung für Wasser in Abbildung 2.4 nicht mehr vernachlässigt werden, so dass sich c_m ungleich c_0 ergibt. Somit ergibt sich aus Gleichung 2.14 vereinfacht

$$p = \kappa \cdot s + [B/2] \cdot s^2. \quad (2.15)$$

Differenziert man die Gleichung 2.15 nach der Dichte, so erhält man auf Basis von Gleichung 2.12 für die momentane Geschwindigkeit c_m

$$c_m \approx c_0 \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \frac{B}{\kappa} \frac{\Delta \rho}{\rho_0}\right]. \quad (2.16)$$

Die Variation der momentanen Schallgeschwindigkeit und damit der Partikelgeschwindigkeit ($u = c_m - c_0$) relativ zur allgemeinen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle c_0 wird durch den Nichtlinearitätskoeffizienten B/κ kontrolliert. Er ist temperaturabhängig und nimmt Werte für Temperaturen bei 10°C und 20°C von 4.6 bzw. 5.0 an (Medwin & Clay, 1998).

Für die Herleitung der Partikelgeschwindigkeit u lässt sich die Funktion des Druckes $p = p_{max} \cos(\omega t - kx)$ und der Verschiebungsgeschwindigkeit $u = u_{max}/\cos(\omega t - kx)$ mit der Wellenzahl $k = \omega/c$ heranziehen. Druck und Geschwindigkeit sind über die Beziehung

$$p = \rho_0 \cdot c_0 \cdot u = \rho_0 \cdot c_0 \cdot u_{max} \cos(\omega t - kx) \quad (2.17)$$

miteinander verknüpft. Der spezifische Wellenwiderstand $\rho_0 c_0$ steuert unter Kenntnis des Druckes die Größe der lokalen Verschiebungsgeschwindigkeit. Für ein nichtlineares Medium enthält das Argument der Sinus-/Kosinusfunktion eine zusätzliche Variable, die momentane Geschwindigkeit in der Wellenzahl k . Weicht diese nur wenig von der mittleren Geschwindigkeit

$$c_m = c_0 + \varepsilon \cdot u \quad (2.18)$$

ab, hat die Gleichung der ebenen Wellen die Form

$$u(x, t) = u_{max} \sin\left(\omega t - \frac{x}{c_0} \cdot \left[1 + \frac{\varepsilon u}{c_0}\right]^{-1}\right). \quad (2.19)$$

Eine Abschätzung, ob nichtlineare Glieder in der Kontinuitäts-, Bewegungs- und Zustandsgleichung berücksichtigt werden müssen, erfolgt über die akustische Machzahl Ma . Sie wird durch das Verhältnis der Amplitude der Schwingungsgeschwindigkeit zur Schallgeschwindigkeit gebildet:

$$Ma = \frac{u_{max}}{c_0} = \frac{\rho_{max}}{\rho_0} = s_{max}. \quad (2.20)$$

Der Grenzwert für die Anwendung des linearisierten Gleichungssystems in Flüssigkeiten und Festkörpern wird von Clay und Medwin (1977) mit 10^{-3} angegeben.

In Abbildung 2.5 wird die physikalische Ausbreitung einer Druckwelle finiter Amplitude dargestellt. Sie zeigt die Druckfunktion entlang der Ausbreitungsrichtung der Welle.

Jeder Punkt des Profils bewegt sich mit der in Gleichung 2.18 beschriebenen Partikelgeschwindigkeit u längs der x -Achse, die in Umgebung der Druckspitzen maximal wird.

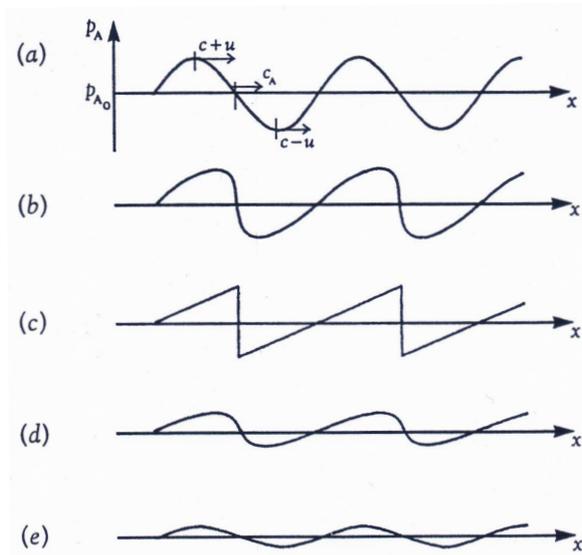


Abbildung 2.5: Effektive, nichtlineare Wechselwirkung bei einer Ausbreitung einer finiten monofrequenten, akustischen Welle (Medwin & Clay, 1998):

(a) Ausgangssituation unmittelbar nach der Anregung einer akustischen Welle finiter Amplitude, c Ausbreitungsgeschwindigkeit, u lokale Partikelgeschwindigkeit. (b) Aufsteilung der Welle durch nichtlineare Wechselwirkung und Relativbewegung der Extrema. (c) Grenzfall einer Schockwelle in Sägezahnform. (d) Auswirkung der Dissipation insbesondere hoher Frequenzen mit zunehmender Alterung der Welle. (e) Infinitesimale Amplitude einer gealterten Schockwelle. (In dieser Abbildung gilt $c_A = c_0$ für mittlere Schallgeschwindigkeit)

Bei minimalen Druck ist die resultierende Geschwindigkeit geringer als die mittlere Schallgeschwindigkeit c_0 . Während somit die Druckminima hinter der Welle zurückbleiben, bewegen sich die Teilchen in der Nähe der Druckspitzen schneller als die Welle, da sie aufgrund der Druckerhöhung eine zusätzliche Beschleunigung erfahren. Die Extrema aufeinanderfolgender Wellenzüge nähern sich einander, so dass die Wellenform zunehmend asymmetrischer und steiler wird und sie schließlich im Grenzfall einer Schockwelle die Form eines Sägezahns annimmt (siehe Abbildung 2.5(c)).

Eine Frequenzanalyse der gezeigten Zeitfolge von Momentbildern der Welle würde ergeben, dass, ausgehend vom monofrequenten Linienspektrum im ersten Fall (Abbildung 2.5(a)), mit zunehmender Aufsteilung höherfrequente Harmonische im Spektrum erscheinen. Solange nichtlineare Effekte wirksam sind, wird kontinuierlich Energie vom Grundfrequenzband in höhere Harmonische übertragen, so dass deren Amplituden mit der Zeit und Entfernung anwachsen. Durch den nichtlinearen Energietransfer entstehen bei finiten Amplituden zusätzliche Spektrallinien der genannten Oberschwingungen,

wobei durch den Energietransfer in höhere Frequenzbänder gleichzeitig die Amplitude der Grundfrequenz reduziert wird (Spieß, 1993). Die dissipativen⁵ Kräfte wachsen proportional zu den entstehenden Dichte- und Druckgradienten. Die Oberschwingungen werden im weiteren Verlauf stärker als die Grundfrequenz gedämpft. Diese Prozesse bewirken neben der sphärischen Divergenz eine allmähliche Amplitudenabnahme.

Die Neubildung harmonischer Oberschwingungen wird zunehmend reduziert und ihre spektralen Amplituden werden geschwächt. Letztlich, wenn sich die Amplituden der Grundfrequenz verringert haben und nichtlineare Effekte nicht mehr von Bedeutung sind, erhält die Welle, wie es in Abbildung 2.5(e) dargestellt ist, wieder nahezu ihre Ausgangsform (Spieß, 1993).

Die bislang beschriebenen Phänomene treten im Prinzip bei allen hydroakustischen Systemen auf, sofern über die Transducerflächen genügend Leistung abgestrahlt wird. Nichtlineare Effekte konnten bislang allerdings nicht für die prinzipielle Verbesserung von Messgeräten ausgenutzt werden. Dies gelingt erst mit dem **parametrischen Effekt**, der durch die simultane Aussendung zweier benachbarter Frequenzen finiter Amplitude entsteht.

Wie erste Untersuchungen von Westervelt (1963) und Berktaf (1965) zeigten, führen zwei monofrequente, gleichzeitig und koaxial abstrahlte Schallwellen der Grundfrequenzen ω_1 und ω_2 , deren Differenz klein ist, zu Schwebungen im Interferenzmuster, bei denen neue Amplituden mit der Summenfrequenz $\omega_1 + \omega_2$ und der Differenzfrequenz $\omega_1 - \omega_2$ entstehen. Die Differenzfrequenz ist aufgrund der sehr guten Richtcharakteristik der höherfrequenten Primärsignale für weitere technische Anwendungen von Interesse. Werden nun zwei Primärwellen mit den Frequenzen ω_1 und ω_2 , die sich mit den Formeln

$$p_1(t) = P_1 \cos(\omega_1 t) \quad (2.21)$$

und

$$p_2(t) = P_2 \cos(\omega_2 t) \quad (2.22)$$

beschreiben lassen, in gleicher Richtung und mit hoher Intensität in die Wassersäule emittiert, so beeinflussen sich diese gegenseitig. Die Amplitude p_1 wird aufgrund der lokalen Druckerhöhung durch die zweite Welle mit der Amplitude p_2 moduliert, so dass sich $P_1(1 + m \cos(\omega_2 t))$ für p_1 ergibt. Bei $m = P_2/P_1$ handelt es sich um die Modulationsamplitude. Wird nun das modulierte p_1 in die Gleichung 2.22 eingesetzt, ergibt sich

$$p(t) = P_1 \cos(\omega_1 t) + P_2 \cos(\omega_2 t) + P_1 m \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) \quad (2.23)$$

Der dritte Term beschreibt dabei die nichtlineare Komponente, wobei $m(P_1, P_2)$ als Maßstabsfaktor für deren Stärke anzusehen ist. Um die Generierung der Summen- und

⁵Dissipation: Übergang einer Energieform in Wärmeenergie. In diesem Fall hervorgerufen durch Absorption bei der Schallausbreitung im Wasser.

Differenzfrequenz leichter nachvollziehen zu können, wird diese Formel mit Hilfe des trigonometrischen Theorems

$$2 \cos x \cos y = \cos(x + y) + \cos(x - y) \quad (2.24)$$

umgestellt zu

$$p(t) = P_1 \cos(\omega_1 t) + P_2 \cos(\omega_2 t) + \frac{P_1 m}{2} [\cos(\omega_\Sigma t) + \cos(\omega_\Delta t)] \quad (2.25)$$

mit der Summenfrequenz $\omega_\Sigma = \omega_1 + \omega_2$ und der Differenzfrequenz $\omega_\Delta = \omega_1 - \omega_2$. Als Quellen dieser beiden Frequenzen können alle Raumpunkte angesehen werden, an denen die nichtlineare Wechselwirkung stattfindet. Sie werden als volumetrische Quellen bezeichnet und generieren in jedem Elementarvolumen innerhalb des Schallkegels der Primärfrequenzen eine Elementarwelle im Sinne des *Huygens*'schen Prinzips. Dieses Modell wird auch als 'Parametric Array' oder 'Virtual End-Fire Array' bezeichnet.

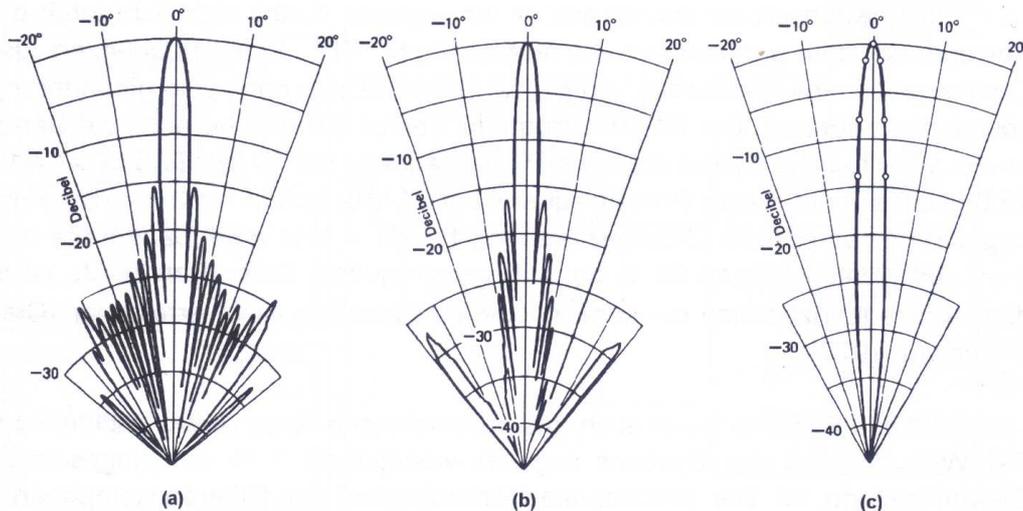


Abbildung 2.6: Richtcharakteristik einer parametrischen Quelle mit den Primärfrequenzen 418 kHz (a) und 482 kHz (b) und der Differenzfrequenz 64 kHz (c) (Muir, 1974). Die Amplituden sind in dB relativ zum Maximum angegeben.

Wie anhand der Abbildung 2.6 gut zu erkennen ist, besitzt die niederfrequente Komponente eine sehr eng begrenzte Abstrahlcharakteristik (2.6 (c)), da die Wechselwirkung nur innerhalb der Schallkegel der Primärfrequenzen stattfindet. Die Richtcharakteristik der Differenzfrequenz (2.6 (c)) zeigt auch keine Nebenkeulen mit nennenswerten Amplituden, während die Amplituden der Nebenkeulen der Primärfrequenzen (2.6 (a) und (b)) bis auf -15 dB anwachsen.

Ein Anwachsen der Bandbreite des niederfrequenten Nutzsignals ist ein weiterer Vorteil, der sich durch die Anwendung eines parametrischen Arrays ergibt. Die Bandbreite

einer Primärquelle liegt in der Größenordnung von einigen Prozent der ausgestrahlten Frequenz. Bei der durch den nichtlinearen Effekt erzeugten Differenzfrequenz sind die absoluten Bandbreiten der höheren Primärfrequenzen übertragbar.

Liegt beispielsweise die Bandbreite einer Frequenz von 18 kHz bei $\pm 5\%$ (17.1-18.9 kHz), und wird eine zweite Frequenz mit gleicher prozentualer Bandbreite von 22 kHz (20.9-23.1 kHz) abgestrahlt, so hat die Differenzfrequenz von 4 kHz eine mit Primärquellen nicht zu erreichende, hohe Bandbreite von etwa 1 kHz, was 25 % der Referenzfrequenz entspricht. Aufgrund der großen Bandbreite ist mit parametrischen Quellen eine dementsprechend bessere Kontrolle über die Form des abgestrahlten Signals und seine Anstiegsflanken möglich. Nachschwingungen werden weitgehend unterdrückt, da die Transducer nicht im Resonanzbereich arbeiten (Spieß, 1993).

Diesem eindeutigen Vorteilen eines parametrischen Echolotsystems steht jedoch ein geringer Wirkungsgrad gegenüber, der bei weniger als 1 % der eingebrachten Gesamtleistung liegt. Der prozentuale Wirkungsgrad der Differenzkomponente berechnet sich nach (Medwin & Clay, 1998) aus:

$$\text{Wirkungsgrad}[\%] = \frac{\pi \beta^2 f_{\Delta}^2 W_0}{2 \rho_0 c_0^5 \theta_{\Delta}^2} \cdot 100. \quad (2.26)$$

Werden nun die Parameter des Parasound-Sedimentecholotes mit einer Ausgangsleistung $W_0 = 70 \text{ kW}$, einer Differenzfrequenz $f_{\Delta} = 4 \text{ kHz}$, einem Öffnungswinkel der Differenzfrequenz $\theta_{\Delta} = 2^{\circ} = 0.035 \text{ rad}$ eingesetzt und für die Zustandsgrößen des Meerwassers bei einer Temperatur von 20°C und einem Salzgehalt von 35 psu, eine Dichte $\rho_0 = 1025 \text{ kg/m}^3$ sowie eine mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit $c_0 = 1521 \text{ m/s}$ zu Grunde gelegt, ergibt sich ein theoretischer Wirkungsgrad von 0.2 %. Dies entspricht in Bezug auf die eingebrachte Ausgangsleistung des Parasound-Schallgebers W_0 einer effektiven Leistung der parametrischen Quelle von 140 Watt (Bergmann, 1995).

Zur Optimierung des Wirkungsgrades kann versucht werden, entweder die Differenzfrequenz oder die Gesamtleistung zu erhöhen oder den Abstrahlwinkel zu verringern. Dem sind aber technische und physikalische Grenzen gesetzt. Das Verringern des Abstrahlwinkels, was durch eine Vergrößerung der Transducerflächen erreicht werden könnte, stößt beim Einbau der Systeme auf technische Grenzen. Das Verwenden von höheren Primärfrequenzen würde stärkere Absorptionseffekte mit sich führen. Gleiches gilt für das Erhöhen der Differenzfrequenz, die zwar einen höheren Wirkungsgrad besäße, aber bei der Ausbreitung in der Wassersäule wieder stärker gedämpft werden würde.

Die einzig erfolgversprechende Lösung, eine Erhöhung der Gesamtleistung, wird durch Sättigungseffekte, eine Strahlverbreiterung oder Kavitationseffekte eingeschränkt (Spieß, 1993). Kavitation an der Strahlfläche eines Schallwandlers tritt ein, wenn die akustische Leistung soweit gesteigert wird, dass unter Einfluss der negativen Druckamplitude der Dampfdruck der Flüssigkeit unterschritten wird. Kavitation äußert sich in kleinen Bläschen, die vor der Wandlerstrahlfläche entstehen und wieder zerfallen (Urban, 2002). Diese können extreme Verzerrungen und eine hohe Absorption der Signale bewirken.

Der Kavitationseinsatz hängt vom statischen Druck, der Viskosität der Flüssigkeit und der Dauer des Einwirkens negativer Druckamplituden (Pulsdauer) ab. Die Kavitationsschwelle wird erreicht, wenn der negative Spitzendruck an der wasseroberflächennahen Wandlerfläche genau so groß wie der atmosphärische Druck von $1.0325 \cdot 10^5$ Pa ist. Die bei der Kavitation stark oszillierenden kleinen Wasserdampfblasen können nahe fester Oberflächen auch dazu führen, dass diese beschädigt werden (Medwin & Clay, 1998) und somit auch die Wandlerfläche zerstören.

2.5 Technische Konzeption des Hydrosweep DS-2

Das in den Diensten des Alfred-Wegener-Institutes Bremerhaven stehende Forschungsschiff 'Polarstern' ist seit 1997 mit dem Fächersonar-System Hydrosweep DS-2 des Bremer Unternehmens Atlas Hydrographic GmbH (vormals STN Atlas Electronics GmbH) ausgestattet. Beim Aussenden des Erregerpulses mit einer Frequenz von 15.5 kHz wird im Messmodus ein Fächer quer zur Fahrtrichtung des Schiffes aufgespannt, so dass eine flächenhafte Erfassung des Meeresbodens ermöglicht wird. Neben der Tiefenmessung können auch Sidescan-Darstellungen simuliert und mit Hilfe der Backscatter-Informationen, welche Aufschluss über die Rückstreuungseigenschaften des zurückkommenen Bodensignals geben, weitergehende Untersuchungen des Meeresboden durchgeführt werden. Eine Übersicht über einige technische Merkmale des Systems sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Technische Spezifikation des Hydrosweep DS-2 (Atlas, 1997)

Sonar-Technik	
Tiefenmessbereich	10 m-11.000 m
Impulsfrequenz	15,5
Bandbreite	± 0.6 kHz
Ausgangspegel	>210 dB (10 - 100 m)/>220 dB (100 - 1000 m) />237 dB (>1000 m)
Öffnungswinkel	120° (10 - 4.700 m)/90° (10 - 8.000 m) /60° (8.000 - 11.000 m)
Tiefengenauigkeit (STN Atlas)	< 1,0 % der Wassertiefe
Refraktionskorrektur	CTD-Profil/Schallgeschwindigkeitssensor /Kreuzfächerkalibrierung
Anzahl der PFB (PreFormed Beams)	59
Öffnungswinkel eines PFB	4,5° (10 - 100 m)/2,3° (100 - 11000 m)

Der ausgesendete Fächer ist strahlstabilisiert, so dass der Centerbeam lotrecht unter der Schiffsposition liegt und demnach gleichbedeutend mit dem Nadirbeam ist. Mit Kennt-

nis der Neigungswinkel des Schiffes (Roll- und Pitchwinkel), welche durch die MINS⁶ gemessen werden, kann die Lage der einzelnen Schallgeberelemente des Transducer-Array so relativ zueinander bestimmt werden, dass durch ein verzögertes Ansteuern jedes Elements eine ebene horizontale Wellenfront vertikal nach unten abgestrahlt wird.

Die zurückkommenden Signale werden festen Winkeln (ab 100 m Tiefe 2.3°) zugeordnet, so dass sich 59 Richtungen, die sogenannten PreFormed Beams (PFB), ergeben. In Verbindung mit den nach dem Amplitudenverfahren gemessenen Zweiwegelaufzeiten für diese Winkelabschnitte des Fächers lassen sich daraus unter Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls im Meerwasser die 59 diskreten Tiefenwerte eines Fächers generieren.

$$h = \frac{1}{2} \cdot c_m \cdot t \quad (2.27)$$

Hier steht c_m für c_{mean} , die mittlere Schallgeschwindigkeit im Meereswasser.

Ein Wasserschallgeschwindigkeitsprofil kann zum Beispiel durch den Einsatz einer CTD (Conductivity, Temperature, Depth)-Sonde über das Messen des Salzgehaltes, der Temperatur und des Druckes als Querschnitt durch die Wassersäule ermittelt werden. Für die Berechnung der Schallausbreitungsgeschwindigkeit in Wasser gibt es die verschiedensten Formeln, wobei hier insbesondere auf die Formel nach Chen & Millero in Anhang B verwiesen wird.

Das Hydrosweep DS-2 verfügt auch über die Möglichkeit, die mittlere Wasserschallgeschwindigkeit mit Hilfe der Kreuzfächerkalibrierung zu berechnen (siehe Abbildung 2.7).

Dabei wird im Kalibrierungsmodus der Fächer längs zu Fahrtrichtung ausgerichtet, um ein sogenanntes Eichprofil zu messen. Unter der Bedingung einer linienhaften Profildfahrt fallen die so erhaltenen Tiefenwerte mit den Nadirtiefen der zurückliegenden Fächer im Messmodus zusammen. In einem iterativen Prozess werden nun die Tiefenwerte des Eichprofils mit den Nadirrichtungen verglichen und über die Differenzen der beiden Tiefen die Verbesserungen für den Wert der mittleren Wasserschallgeschwindigkeit errechnet. Der so erhaltene c_{mean} -Wert kommt der tatsächlichen mittleren Wasserschallgeschwindigkeit sehr nahe und kann zur Refraktionskorrektur⁷ genutzt werden (Schenke, 1990).

Diese Verfahrensweise hat den Vorteil, dass Messfahrten nicht durch CTD-Mess-Stationen, welche bei 5000 m Tiefe ca. 3 Stunden in Anspruch nehmen, unterbrochen werden müssen. Zusätzlich entfällt auch die zeitaufwendige manuelle Eingabe des mit Hilfe der CTD-Messung gewonnenen Wasserschallprofils in HydroMap Online. Somit wird die

⁶MINS steht für Marine Internal Navigation System. Es handelt sich um eine Inertial-Laser-Plattform, mit der optisch die Schiffsbewegungen (Roll und Pitch) und -ausrichtung (Heading) gemessen werden. Desweiteren verfügt sie über einen präzisierenden Positionsfilter.

⁷Refraktion ist die Brechung der Schallstrahlen an Grenzschichten zweier Wasserschichten, die unterschiedliche physikalische Eigenschaften und somit auch verschiedene Wasserschallgeschwindigkeiten aufweisen.

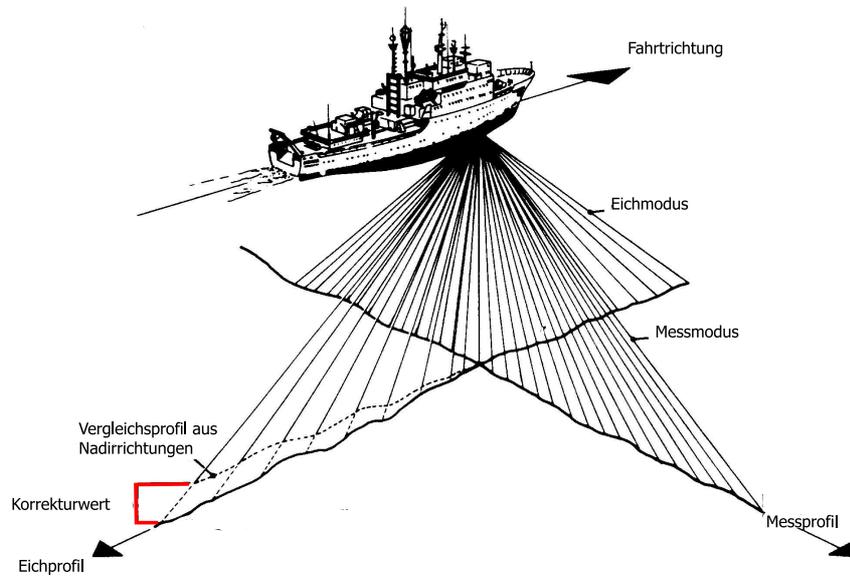


Abbildung 2.7: Prinzip der Kreuzfächerkalibrierung (Schenke, 1992)

mittlere Wasserschallgeschwindigkeit üblicherweise, mit dem 'Calibration-Mode' in HydroMap Online bestimmt.

Die Berechnungen der Korrekturwerte für c_{mean} mittels der Kreuzfächerkalibrierung sind aber auch allen Fehlereinflüssen einer Fächlotmessung (siehe auch Tabelle 3.1) ausgesetzt, was insbesondere bei Eisfahrten für das Messgebiet zu nicht repräsentativen Ergebnissen führt. Diese fehlerhaften mittleren Wasserschallgeschwindigkeiten führen dann zur Bestimmung inkorrekturer Tiefen der einzelnen Beams und somit zur Deformation des Fächers.

Ein Kompromiss zwischen der zeitnahen Kalibrierung und der 'besseren' CTD-Messung ist der Einsatz eines 'Expendable Bathymetric Thermographs' (XBT). Dabei handelt es sich um eine kostengünstige Sonde mit einem Temperatursensor für den einmaligen Gebrauch, bei der die beim Absinken des Gerätes gemessenen Daten über einen dünnen Metallfaden an einen Bordrechner übertragen werden, bis die XBT zu tief sinkt und der Verbindungsdraht abreißt. So lässt sich der Verlauf der Temperatur, die nach der tiefenabhängigen Zunahme des Druckes den größten Einfluss auf die Wasserschallgeschwindigkeit besitzt, für die stärkeren Schwankungen unterworfenen oberen Schichten des Wasserkörpers bestimmen, ohne dass die Profiltiefe unterbrochen werden muss. Es können dabei Profiltiefen von bis zu 800 m erreicht werden. Das Messen mit XBTs ist aufgrund des Antarktis-Schutz-Vertrages südlich von 60° Süd nicht erlaubt und ist somit auch nur beschränkt durchführbar.

Eine ausführliche Diskussion zu den Problematiken der Kreuzfächerkalibrierung ist bei Büchenschütz-Nothdurft (2002) zu finden.

Der Öffnungswinkel des ausgesendeten Schallfächers ist bis zu Tiefen von 4700 m wahlweise auf 90° bzw. 120° einstellbar, wobei ein Streifen des Meeresgrundes von einer Breite des 2 fachen bzw. 3.5 fachen der Wassertiefe beschallt und somit abgedeckt wird. Ein weiterer Öffnungswinkel hätte zwar den Vorteil einer wesentlich größeren Abdeckung, allerdings ergeben sich daraus auch einige Nachteile, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird.

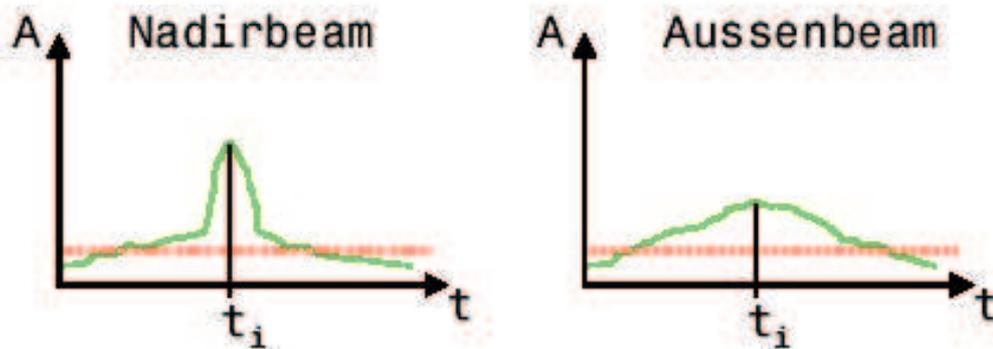


Abbildung 2.8: Spezielle Fälle der Laufzeitmessung nach Amplitudenverfahren. Überschreitet die Signalstärke (Amplitude) einen Schwellwert (in rot), so wird die Fläche ermittelt, die sich zwischen Schwellwert und Signal befindet. Der Schwerpunkt der Fläche bestimmt die Laufzeit des Signals (Büchenschütz-Nothdurft, 2002)

Trotz einer breiteren Ausdehnung bleibt die Anzahl der Tiefenwerte eines Fächers auf 59 beschränkt, was wegen der größeren Abstände benachbarter Tiefenpunkte der einzelnen PFB Footprints eine geringere Datendichte zur Folge hat. Erschwerend kommt hinzu, dass sich mit größeren Winkelabständen zum Nadir des Fächers auch die negativen Einflüsse der Refraktion bei geschichteten Wasserkörpern vergrößern und sich eine fehlerhafte c_{mean} -Bestimmung sowie Divergenz und Absorption wegen des längeren Weges durch die Wassersäule im größeren Maße auf die Tiefenbestimmung auswirken. Unter der Annahme eines weitgehend ebenen Meeresbodens verschlechtert sich die Schnittgeometrie für Reflexion der Schallsignale am Meeresboden für die äusseren PFBs dahingehend, dass nur noch deutlich schwächere Streusignale vom Transducer empfangen werden, die zudem auch noch länger anhalten, was sich auf die Bestimmung der Laufzeit negativ auswirkt (siehe Abbildung 2.8). In Folge dieser messtechnischen Nachteile ist der Betrieb des Hydrosweep DS-2 mit einem Öffnungswinkel von 120° nur in Gebieten mit Meerestiefen bis ca. 1000 m anzuraten.

2.6 Technische Konzeption des Parasound Echolotsystems

Bei dem Sedimentecholot Parasound (Atlas Hydrographic GmbH, Bremen) wurde der in Abschnitt 2.4 beschriebene nichtlineare, parametrische Effekt zur Schallerzeugung von niederfrequenten Nutzsignalen technisch umgesetzt und für die marinen Geowissenschaften nutzbar gemacht. Es kombiniert ein Tiefseevermessungslot (NBS - Narrow Beam Sounder) zur Bestimmung der Wassertiefe mit einem Sedimentecholot (SBP - Sub Bottom Profiler), welches den parametrischen Effekt für die Erzeugung einer engen Abstrahlcharakteristik ausnutzt. Der Schallwandler besteht aus 128 piezokeramischen Wandlerelementen, die auf einer rechteckigen Fläche von 0.9 x 1.2 m angeordnet (siehe Abbildung 2.9) sind und mit einer elektrischen Gesamtleistung von 70 kW zur Anregung der beiden Primärfrequenzen angesteuert werden.

Damit steht eine ausreichende Energiemenge zur Erzeugung hoher Druckamplituden für die nichtlineare Wechselwirkung zur Verfügung (Spieß, 1993). Während die eine Primärfrequenz (Pilotfrequenz) von 18 kHz konstant ausgestrahlt wird, kann die zweite Primärfrequenz in 0.5 kHz Schritten im Bereich von 20.5 bis 23.5 kHz variiert werden. Somit ergeben sich für die Differenzfrequenz (Nutzfrequenz) Werte von 2.5 bis 5.5 kHz. Die Nutzfrequenz kann den speziellen Anforderungen der sedimentechographischen Untersuchungen vom Anwender durch Regulierung der zweiten Primärfrequenz angepasst werden.

Tabelle 2.2: Technische Spezifikation des Parasound-Echolotsystems (Atlas, 1989).

Sonar-Technik	
Tiefenmessbereich	10 m - 15.000 m
Impulsfrequenz	Standard: 4 kHz möglich sind 2,5 kHz - 5,5 kHz
Primärfrequenz	18 kHz
Sekundärfrequenz	variabel zwischen 20,5 kHz und 23,5 kHz in 0,5 kHz Schritten einstellbar
Bandbreite	0.5 kHz
Öffnungswinkel	4° (18 kHz Frequenz)
Eindringtiefe	10 m - 200 m
Tiefengenauigkeit (STN Atlas)	0.2 m + 0.1 % der Wassertiefe ^a

^aAngabe des Herstellers für die 18 kHz Frequenz (NBS), bei bekannter Wasserschallgeschwindigkeit und ebenen Meeresboden

Der Öffnungswinkel von 4°, der einen Footprint von 7 % der Wassertiefe beschallt, wird durch die Ausdehnung der Hauptkeule (3 dB-Schwelle) der Pilotfrequenz von 18 kHz aufgespannt, in dessen Kegel die nichtlineare Wechselwirkung stattfinden und die niederfrequente Schallkomponente erzeugt werden kann. Eine solch hohe Richtwirkung des Sendesignals hat aber auch zur Folge, dass nur Reflexionselemente des Meeresbodens,

die eine Neigung kleiner 2° aufweisen, den Empfänger direkt erreichen, da bei einer größeren Geländeneigung der Schall zur Seite reflektiert und nur noch diffuse Streuenergie empfangen wird (Spieß, 1993). Auch wenn sich diese Aussage rein theoretisch auf die Reflexion von Strahlen an glatten Reflektorebenen bezieht und selbst bei wesentlich stärkeren Geländeneigungen aufgrund der Rauigkeit des Meeresbodens noch gute Reflexionssignale empfangen werden können, beinhaltet dies den Umkehrschluss, dass auch die Bewegung des Schiffes während der Messungen mitberücksichtigt werden muss.

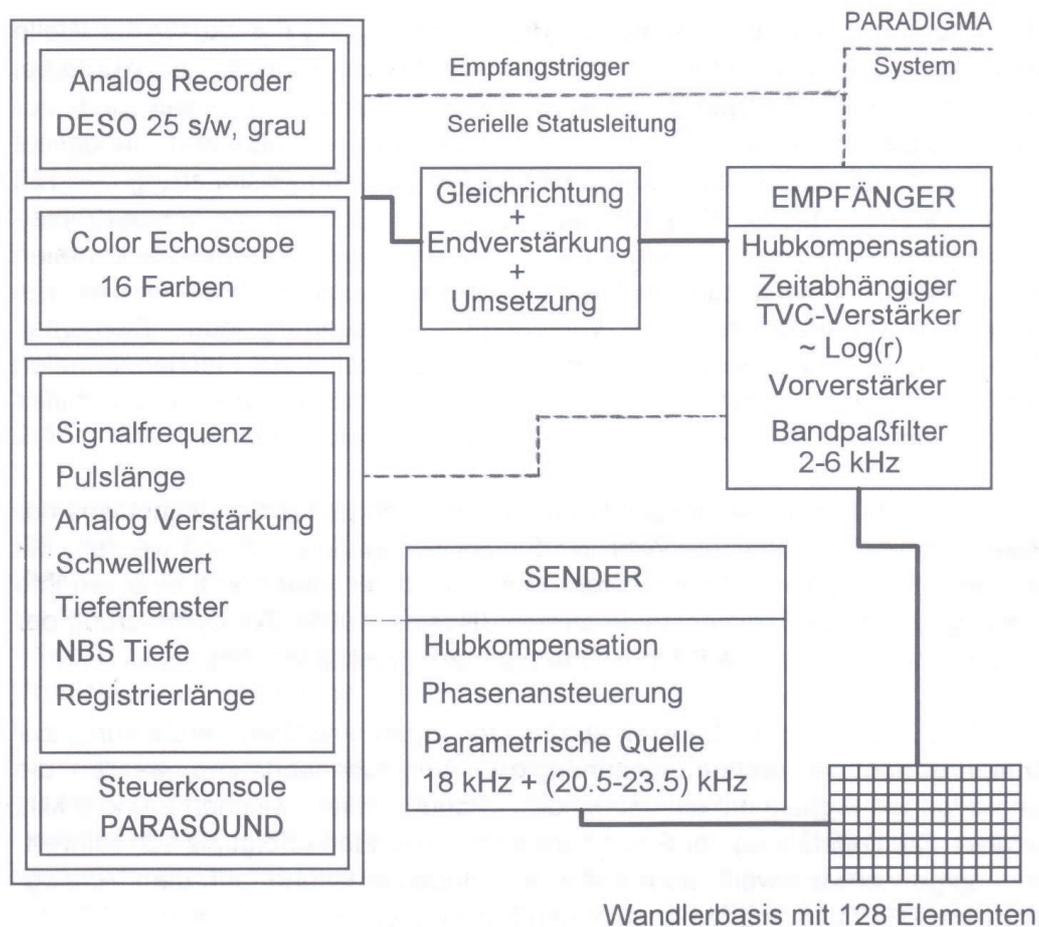


Abbildung 2.9: Technische Konzeption und Gerätekomponenten der Parasound Anlage (Bergmann, 1995)

Durch die Strahlstabilisierung wird gewährleistet, dass das akustische Sendesignal unabhängig von der Schiffsneigung immer senkrecht nach unten gesendet wird. Dies ist erforderlich, damit unter Voraussetzung eines ebenen Meeresboden das reflektierte Echo auch tatsächlich zum Empfänger gelangt und nicht das Sendesignal schon mit einer Neigung in die Wassersäule ausgesandt und nur als diffuse Rückstreuung vom Transducer

empfangen wird. Dies ist auch für die Reproduzierbarkeit von sedimentechographischen Messungen von Bedeutung, da sich sonst schon allein aufgrund der Schiffsbewegungen unterschiedliche Messergebnisse in Folge des beliebig schräg ausgestrahlten Sendesignals ergeben würden.

Ferner sind auch die Hubbewegungen des Schiffes während des Sendens und Empfangens des Signals zu berücksichtigen, da der Schiffshub häufig in der Größenordnung mehrerer Wellenlängen des Quellsignals liegt. Ein auf den Schiff installierter TSS-Hubkompensator⁸ liefert eine zusätzliche Laufzeitkorrektur für Sende- und Empfangszeitpunkt, mit der zwischen den einzelnen Echogrammen ein gemeinsames Bezugsniveau hergestellt wird.

Um dem geringen Wirkungsgrad des parametrischen Effektes entgegenzuwirken, besteht die Möglichkeit, die Länge des Sendeimpulses durch Erstellen der Anzahl der Sinusschwingungen einer Anregung so zu variieren, so dass ohne Änderung der Frequenz mehr Energie abgestrahlt wird und aufgrund konstruktiver Interferenz in der Sedimentsäule eine deutliche Erhöhung der Reflexionsamplitude erzielt wird. Dabei können bis zu acht Perioden (Sinusschwingungen) a 0.25 ms für eine resultierende Nutzfrequenz von 4 kHz entsprechend einer Gesamtzeit von 2 ms nacheinander gesendet werden.

Nach einer von der Laufzeit abhängigen logarithmischen Verstärkung zur Kompensation der entfernungsabhängigen Amplitudenabnahme werden die empfangenen Signale mit einem analogen Bandpassfilter zwischen 2 und 6 kHz gefiltert (Bergmann, 1995).

Die wichtigste Steuergröße auf der Empfangsseite des Parasound-Systems ist das Tiefenfenster, welches die Verzögerung (Delay) zwischen Sendezeitpunkt und dem Beginn der Seismogrammaufzeichnung definiert. Das Tiefenfenster wird in Metern angegeben und über die normierte Wasserschallgeschwindigkeit von 1500 m/s in eine Zweiwegelaufzeit umgerechnet. Nach diesem Delay wird für eine ebenso in Metern anzugebene Registrierdauer die zurückkommenden Reflexionssignale als Seismogramm aufgezeichnet. Das Tiefenfenster wird manuell vom Parasound-Operator nachgeführt. Die fehlerhafte Einstellung kann zur Überlappung von Sendefolge und Rückkehr von Echos sowie dem Ausfall von Seismogrammspuren am Ende einer Amplitudenaufzeichnung führen. Zur Orientierung für das korrekte Einstellen des Empfangsfensters wird dem Parasound-System auch die auf 1500 m/s normierte Centerbeam-Tiefe des Hydrosweep-Fächerlotes übermittelt.

Die in den Transducern durch die zurückkommenden Reflexionswellen erzeugten Spannungen (Abbildung 2.10) werden mit einem Voltmeter, das eine maximale Abtastfrequenz von 100 kHz besitzt, digitalisiert. Um die in kurzen Zeitabständen auflaufenden Datenmengen fehlerfrei registrieren zu können, ist es möglich unter Ausnutzung des gesamten Datenpuffers die Seismogramme der Pulsfolge erst zu digitalisieren und an-

⁸TSS ist der Markenname unter dem die Firma VS TSS Ltd (GB) Bewegungssensoren vertreibt. Auf dem FS 'Polarstern' befindet sich nur ein Hubkompensator diesen Fabrikats, dessen Werte ebenfalls bei die Messungen der Hydrosweep-Anlage berücksichtigt werden.

schließlich in der Empfangspause dem Steuerungsrechner zur Speicherung auf die Festplatte zu übergeben (Spieß, 1993).

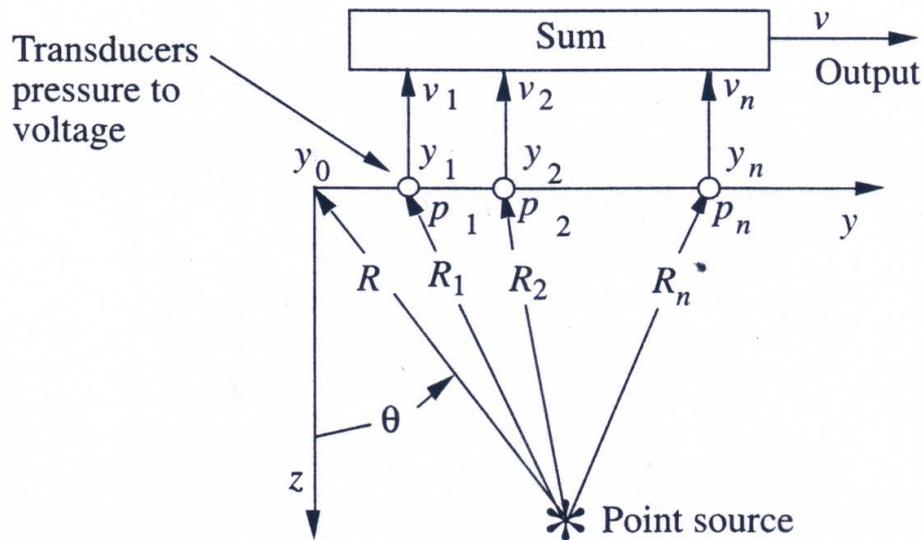


Abbildung 2.10: Darstellung einer Punktquelle (Reflektor am Meeresboden) und eines Empfänger-Arrays (Medwin & Clay, 1998)

Die Messungen des Parasound-Sedimentecholotes können mit Hilfe der ParaDigMA⁹-Software aufgezeichnet werden. Dieses Programmpaket beinhaltet neben der interaktiven Steuerung der Datenakquisition der Seismogramme auch die Möglichkeit, unter Nutzung verschiedener Filterungsmethoden Bildschirmdarstellungen der schon aufgezeichneten PS3-Dateien zu erstellen. Somit lassen sich Messergebnisse nochmals überprüfen oder ggf. interessante Profilabschnitte hinsichtlich möglicher geologischer Beprobungen genauer betrachten.

Die Boden- und Untergrundstrukturen werden über die Gesamtheit der Seismogramme in chronologischer Reihenfolge durch optische Korrelation der Bezugshorizonte, die mit Hilfe der Tiefenfenster vom Operator manuell eingestellt worden sind, nachgezeichnet. Dies wird in Echtzeit durch einen DESO 25 Echographen in schwellwert- und amplitudenabhängiger Grauwertdarstellung auf Thermopapier aufgezeichnet und mit dem angeschlossenen Farbbildschirm (Color Echoscope) dargestellt. Die Darstellung des Farbbildschirmes kann optional durch einen angeschlossenen Farbdrucker in Papierform ausgegeben werden.

⁹ParaDigMA steht für Parasound-Digitalisierungs- und Mehrkanal-Auswertesystem und wurde von Dr. Volkhard Spieß von der Universität Bremen (Marine Technologie/Umweltforschung - MTU) in Kooperation mit STN Atlas entwickelt.

Darüber hinaus werden die einzelnen Seismogrammspuren zusammen mit einem Header, in denen die Navigationsdaten aus PODAS¹⁰ und sämtliche Steuerungsparameter des Parasoundsystems eingetragen sind, über das auf MS-DOS Basis arbeitende Datenerfassungsprogramm ParaDigMA im binären PS3-Format in digitaler Form auf Festplatte gespeichert. Das über eine serielle Schnittstelle eingelesene Navigationstelegramm aus PODAS wird dabei nur alle 5 Sekunden aufdatiert.

Die Verfügbarkeit der im PS3-Format gespeicherten digitalen Echogramme des Parasound Sedimentecholotes erlaubt die Archivierung, die seismische Prozessierung von Einzelspuren und Profilsektionen sowie eine beliebig skalierbare graphische Ausgabe von Seismogrammen.

Der Anwender kann zwischen zwei verschiedenen Arten des seismischen Messbetriebs wählen, dem Normal- und dem Pilottonbetrieb.

Im **Normalbetrieb** wird während einer Triggerperiode ein Messimpuls ausgesendet. Das Transducer-Array wartet bis zum Empfang des Reflexionssignals, um danach in der nächsten Triggerperiode mit der Messung fortzufahren. In Tabelle 2.3 sind die wesentlichen Parameter für diesen Betriebsmodus in Abhängigkeit von der Wassertiefe dargestellt. Dabei ist die laterale Auflösung eines seismischen Profils, also der Schussabstand der einzelnen Messungen, neben der Wassertiefe auch entscheidend von der Geschwindigkeit über Grund des Schiffes abhängig.

Tabelle 2.3: Registrierparameter für den Normalbetrieb des Parasound-Systems aus (Spieß, 1993)

Wassertiefe in [m]	Zweiwegelaufzeit in [s]	Triggerperiode in [s]	Footprint in [m]	Schussabstand(SA) /Überlappungszahl(ÜZ) bei 5 kn in [m]	SA/ÜZ bei 10 kn in [m]	SA/ÜZ bei 15 kn in [m]
50	0.07	0.21	3.5	0.5/07	1.0/3	1.5/2
100	0.13	0.42	7	1.0/07	2.0/3	3.0/2
200	0.27	0.83	14	2.0/07	4.0/3	8.0/2
500	0.67	1.33	35	3.3/10	6.6/5	10.3/3
1000	1.33	2.14	70	5.3/13	10.6/7	16.2/4
2000	2.67	4.67	140	12.0/11	24.0/6	36.0/4
3000	4.00	8.31	210	21.3/10	42.7/5	64.0/3
4000	5.33	8.31	280	21.3/13	42.7/7	64.0/4
5000	6.67	8.31	350	21.3/16	42.7/8	64.0/5
6000	8.00	13.67	420	35.2/12	70.3/6	105/4
10000	13.33	13.67	700	35.2/20	70.3/10	129/7

Ein weiterer interessanter Parameter ist die Überlappungszahl (ÜZ, siehe Tabelle 2.3),

¹⁰PODAS ist das Polarstern-Datenmanagement-System, welches von der Firma Werum Software & Systeme AG mit Sitz in Lüneburg eingerichtet wurde.

die angibt wieviel benachbarte Footprints sich in einem Punkt am Meeresboden überschneiden. Mit ihrer Hilfe läßt sich die Redundanz zwischen den einzelnen Seismogrammen abschätzen. Die Überlappungszahl ist abhängig von der Geschwindigkeit des Schiffes, der Wassertiefe und der Schussfolge der Sendesignale. Die Dauer einer Triggerperiode wird durch die Einstellung des Rangebereichs durch den Anwender festgelegt.

Mit diesem Schalter sind Werte in Metern für die Wassertiefe einstellbar, welche den maximalen Tiefenwert für den jeweiligen Messbetrieb darstellen sollen. Da das gesamte System mit einer normierten Wasserschallgeschwindigkeit von 1500 m/s arbeitet, ergibt sich die Dauer der Triggerperiode aus der Zweiwegelaufzeit für den eingestellten maximalen Tiefenwert des Rangebereichs zuzüglich der Registrierdauer des Echolotes von maximal 0.3 s.

So beträgt die Triggerperiode bei einem Range von 5000 m oder 10000 m 8.31 s bzw. 13.67 s. Da der nächstkleinere Rangebereich von 2000 m mit einer Triggerperiode von 4.67 s bei den typischen Einsatzgebieten von FS 'Polarstern' nur selten genutzt werden kann, ist aufgrund der doch recht groben Skaleneinteilung der Rangebereiche ersichtlich, dass das Parasound-Echolot im Normalbetrieb die längste Zeit auf Stand-By-Modus verweilt und auf das zurückkommende Signal der Nutzfrequenz wartet.

Dabei können gerade in der Tiefsee die Schussabstände der einzelnen Messungen auf über 40 m anwachsen, was jedoch in Anbetracht des Footprintdurchmessers immer noch eine Korrelation der benachbarten Seismogramme zulässt. Allerdings wäre aber gerade im unteren Tiefenbereichen einer Range-Skala wie z. B. 2200 m (Range: 5000 m) hinsichtlich der Zweiwegelaufzeit theoretisch eine dreifach so hohe Datendichte und somit auch eine größere Überlappungszahl möglich.

Im **Pilottonbetrieb** wird eine Möglichkeit der effektiveren Nutzung einer Triggerperiode umgesetzt. Ein Sende- und Empfangszyklus innerhalb diesem Modus ist so organisiert, dass innerhalb der bis zum Empfang des Reflexionssignals verbleibenden Zeitspanne mehrere Impulse in Abständen von 0.4 s in die Wassersäule ausgesendet werden. Dabei ist die Kenntnis der zu erwartenden Meeresbodentiefe notwendig, um über die Zweiwegelaufzeit Z die Zahl der Pulse für eine Triggerperiode TP berechnen zu können. Die Tiefe wird mit dem 18 kHz Signal des NBS bestimmt und in die folgende Berechnung eingebracht.

$$n = \frac{\min(Z, TP - Z)}{0.4} - 2 \quad (2.28)$$

mit $Z = 2T/1500$ (T = Tiefe; normierte Schallgeschwindigkeit von 1500 m/s)

Charakteristisch für diese Betriebsart ist die inhomogene Datendichte, da auf eine Serie von Pulsen eine längere Datenlücke dadurch entsteht, dass der Transducer für die Zeitspanne der rückkehrenden Signale auf Empfang geschaltet ist. Das Verhältnis variiert mit der Wassertiefe und ist für gängige Wassertiefen in Tabelle 2.4 zusammengefasst. Die Dauer einer Triggerperiode ist aber auch im Pilottonmodus abhängig von den Ein-

stellungen des Rangesbereiches. Ausschlaggebend für die Wahl des Tiefenbereiches ist das Verhältnis von Überdeckungsbereich und Datenlücken. Das ist gerade nahe der Übergangsbereiche wie z.B von 4000 m bis 5000 m Tiefe zu berücksichtigen.

Tabelle 2.4: Registrierparameter für den Pilottonbetrieb des Parasound-Systems (Spieß, 1993)

Wassertiefe in [m]	Zweiwegelaufzeit in [s]	Anzahl Pulse	Länge Pulsfolge in [m]	Über- deckung in [%]	Foot- print in [m]	Überdeckungsbereich/Datenlücken		
						bei 5 kn in [m]	10 kn in [m]	15 kn in [m]
Range 5000 m: Triggerperiode 8.31 s								
1000	1.33	1	0.4	5	70	1.0/20.4	2.0/40.8	3.0/61.2
1500	2.00	3	1.2	14	105	3.1/18.3	6.2/36.6	9.3/54.9
2000	2.67	4	1.6	19	140	4.1/17.3	8.2/34.6	12.3/51.9
2500	3.33	6	2.4	29	175	6.2/15.2	12.4/30.4	18.6/45.6
3000	4.00	8	3.2	39	210	8.2/13.2	16.4/26.4	24.6/39.6
3500	4.67	7	2.8	34	245	7.2/14.2	14.4/28.4	21.6/42.6
4000	5.33	5	2.0	24	280	5.1/16.3	10.2/32.6	15.3/48.9
4250	5.67	4	1.6	19	297	4.1/17.3	8.2/34.6	12.3/51.9
4500	6.00	3	1.2	14	315	3.1/18.3	6.2/36.6	9.3/54.9
5000	6.67	1	0.4	5	350	1.0/20.4	2.0/40.8	3.0/61.2
Range 10000 m: Triggerperiode 13.67 s								
3500	4.67	9	3.6	26	245	9.3/81.1	18.6/162.2	27.9/243.3
4000	5.33	11	4.4	32	280	11.3/79.1	22.6/158.2	33.9/237.3
4250	5.67	12	4.8	35	297	12.3/78.1	24.6/156.2	36.9/234.3
4500	6.00	13	5.2	38	315	13.4/77.0	26.8/154.0	40.2/231.0
5000	6.67	14	5.6	41	350	14.4/76.0	28.8/152.0	43.2/228.0
5500	7.33	13	5.2	38	385	13.4/77.0	26.8/154.0	40.2/231.0
6000	8.00	12	4.8	35	420	12.3/78.1	24.6/156.2	36.9/234.3

Gegenüber dem Normalbetrieb stellt der Pilottonmodus in Bereichen der schnellen Triggerfolge mit einem Schussabstand von wenigen (1-3) Metern eine erhebliche Verdichtung der Informationen da, so dass eine hohe Redundanz und hohe laterale Auflösung innerhalb der Pulsfolge erzielt werden kann und somit auch kleinräumige morphologische Strukturen erkannt werden können (Spieß, 1993).

2.7 Positionierungskonfiguration auf dem FS 'Polarstern'

Um die Tiefenwerte und Seismogramme dieser beiden beschriebenen Echolot-Systeme georeferenziert darstellen zu können, werden die Daten der Schiffpositionierung an die Messsysteme übertragen, so dass die einzelnen Messereignisse über die Zeit mit einer konkreten Position verknüpft werden. Da die Handhabung dieser Positionszuordnung

für die weitere Bearbeitung und Interpretation der Daten von Bedeutung ist, wird in diesem Abschnitt auf die Verteilung der Navigationsdaten, wie sie während der Expedition ANT XIX-2 konfiguriert war, näher eingegangen.

FS ‘Polarstern’ besitzt eine Vielzahl von Positionssensoren, welche für die Positionierung des Schiffes und deren Mess-Sensoren (wie z.B. Hydrosweep und Parasound) zur Verfügung stehen. Nachfolgend sollen die in Tabelle 2.5 aufgeführten Systeme und deren Konfiguration kurz vorgestellt werden.

Tabelle 2.5: Navigationsrelevante Sensoren und Systeme auf FS ‘Polarstern’

Modellbezeichnung	Hersteller	Anzahl	Ein/Zwei Frequenzen	integrierter Positionsfilter
GPS-Empfänger				
Z12	Ashtech	1	Zweifreq.	-
MX-400	Leica	1	Einfreq.	-
MS750	Trimble	2	Zweifreq.	-
Raystar 108	Raytheon-Anschütz	2	Einfreq.	-
Navigationsverteilung				
MINS	Raytheon-Anschütz	2	-	ja
NACOS	STN-Atlas	1	-	ja
PODAS	Werum	1	-	-

Der **Ashtech**-GPS-Empfänger ist verantwortlich für die Bereitstellung der Systemzeit (Wempe-Borduhr). Diese dient als Referenzzeit für die gesamte Datenaquisition bei Forschungsfahrten und auf sie werden auch das Datenmanagementsystem PODAS, das Integrierte Navigationssystem NACOS, sowie letztlich auch das Parasound- und Hydrosweep-System synchronisiert.

Die Positionierungsdaten der **Leica**-GPS-Antenne können über einen Racal-Skyfix-Decoder und den Empfang von Referenzsignalen DGPS-korrigiert werden.

Das Skyfix-System von Racal-Survey umfasst ein weltweites Netz aus Referenzstationen, die zur ständigen Aufzeichnung von GPS-Daten dienen. Diese werden an Kontrollstationen weitergeleitet, wo sie nach einer anschließenden Plausibilisierung zur Berechnung von Pseudostreckenkorrekturen herangezogen werden.

Diese Korrekturdaten werden dem maritimen Nutzer zu Verfügung gestellt, indem sie in küstennahen Gebieten über Mittelwelle als Referenzdaten übermittelt werden. In entfernteren Gebieten werden diese Daten über INMARSAT (International Maritime Satellite) in kodierter Form übermittelt. Die Korrekturdaten werden im RTCM-Format alle 5 Sekunden aufdatiert (Bauer, 1997). Um diesen Service nutzen zu können, ist ein Decoder sowie das kostenintensive Freischalten des Gerätes notwendig.

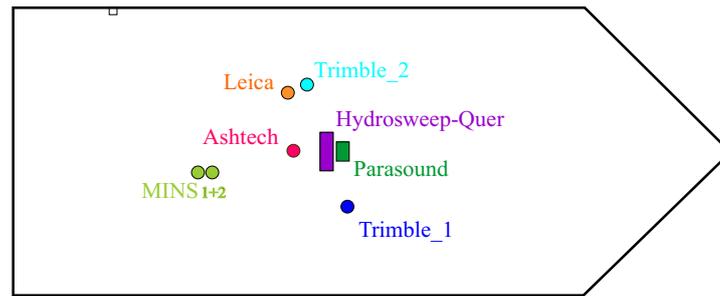


Abbildung 2.11: Schematische Skizze der Sensoren zur Positionierung auf FS ‘Polarstern’

Bei den beiden **Trimble**-GPS-Empfängern und den beiden Inertial-Laser-Plattformen **MINS** (Marine Inertial Navigation System) handelt es sich um redundante, technisch identisch konfigurierte Positionierungssysteme zwischen denen der Nutzer (Nautiker auf der Brücke) umschalten kann. Der Trimble1-Empfänger ist der MINS1 als fest zugeordneter Positionssensor zugewiesen. Dabei stellt immer die aktive Systemseite die Daten für die PODAS Datenbank und das NACOS System bereit, während die zweite als Backup parallel im Hintergrund in Betrieb ist.

Des weiteren zeichnen die Inertialsysteme auch die Schiffsbewegungen Roll und Pitch sowie die Ausrichtung des Schiffes (Heading) auf. Aufgrund der Zusatzinformationen der Fahrtrichtung und Geschwindigkeit über Grund errechnet sich die MINS mit Hilfe eines integrierten prädizierenden Filters ihre Position, bei der die Position des angeschlossenen Trimble-Empfängers in einem untergeordneten Schiffkoordinatensystem – mit der aktiven MINS im Koordinaten-Ursprung – zentriert wird.

Die **Raystar**-GPS-Antennen, die derzeit keinerlei Verwendung finden, dienen als Backup-Sensoren für die beiden MINS-Systeme.

Als positionsrelevante Sensoren gehen in das NACOS-Navigationssystem die ausgewählte MINS und die Leica-GPS-Antenne ein, zwischen denen der Nautiker auf der Brücke wählen kann. Diese ebenfalls innerhalb von NACOS über einen integrierten mathematischen Filter prädizierten Positionsdaten werden an die Lote und das PODAS-System weiter verteilt.

Die Zentrierung des aktivierten Navigationseingangs auf den Hydrosweep-Schwinger erfolgt ebenfalls innerhalb der **NACOS** Navigationsanlage, indem dies ähnlich wie bei der MINS, nun aber im übergeordneten Schiffkoordinatensystem mit der Mitte des Hydrosweep-Querschwingers im Ursprung berechnet wird (siehe Abbildung 2.11). NACOS übermittelt dem Hydrosweep-System im Sekundentakt diese aktuellen, zentrierten Positionsdaten.

Für das Parasound-System übernimmt **PODAS** die Weitergabe der Navigationsinformationen, die neben anderen Sensorinformationen wie z.B. Geschwindigkeit, Heading,

normierte Hydrosweep-Centerbeam-Tiefe u.a. alle 5 Sekunden dem Parasound-System übermittelt werden.

Darüber hinaus werden in PODAS auch die Eigenpositionen nebst weiterer relevanter Parameter aller anderen aktiven Positionierungssensoren im Sekundentakt festgehalten.

Seit der Abschaltung der Selective Availability (SA¹¹) am 2. Mai 2000 ist die 'Stand Alone Position' des Trimble MS750 Zweifrequenz-Empfängers mit ca. 10 Metern relativer Genauigkeit unter der Voraussetzung normaler Schnittbedingungen und genügend vorhandener Satellitenverbindungen vollkommen ausreichend für die Vermessung in der Tiefsee.

Somit sind die Trimble-Empfänger in Kombination mit der MINS nach dem Abschalten der Selective Availability das primäre Positionierungssystem, da dabei keine zusätzlichen Kosten (Skyfix; INMARSAT) entstehen.

¹¹Selective Availability bedeutet 'auswählbare Verfügbarkeit'. Darunter wird das künstliche Verschlechtern des GPS-Signals verstanden. Dies wird durch absichtliche Verfälschung der Bahninformationen oder der Satellitenuhr erreicht, was die Berechnung der Pseudostrecken negativ beeinflusst (Egge, 1998).

3 Aufbereitung und Visualisierung der Fächerlotdaten

3.1 Datengrundlage und -formate

Zur Erstellung der bathymetrischen Karte werden Daten des Fächersonarsystems Hydrosweep DS-2 der mit FS 'Polarstern' durchgeführten Expeditionen ANT IX-3, ANT X-2 und ANT XIX-2 einbezogen. Eine Übersicht dieser Forschungsfahrten im Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

Gerade bei den beiden erstgenannten Forschungsfahrten, die schon über 10 Jahre (1991 bis 1992) zurückliegen, ergaben sich Schwierigkeiten auf die originären Messdaten zurück zu greifen, da die damals erhobenen Tiefendaten auf Magnetbändern abgespeichert wurden. Diese archivierten Datenträger sind momentan nur mit erheblichem zeitlichen und technischen Aufwand in das Rechnersystem einzuspielen, um sie für die Auswertung integrieren zu können.

Letztlich wurde für die Forschungsfahrten ANT IX-3 und ANT X-2 auf die entsprechenden Messdaten zugegriffen, welche in dem AWI-internen Hyd-Format innerhalb des Rechnersystems der Bathymetriegruppe am AWI vorlagen.

Die Messdaten der Expedition ANT XIX-2 hingegen liegen im originären **Surf**¹²-**Format** vor und werden verwendet, da sich für die anschließende Prozessierung der Messdaten (in Abschnitt 3.2.4) Vorteile versprochen werden.

Um den weiteren Ausführungen leichter folgen zu können, wird zunächst kurz auf den üblichen Bearbeitungsablauf der bathymetrischen Daten am AWI und die dabei auftretenden unterschiedlichen Dateiformate eingegangen.

Da die allgemeinen Arbeitsabläufe immer wieder an die ständigen Veränderungen im Bereich der Ortungssysteme, der schiffsinternen Konfiguration der Datenspeicherung, sowie der schnellen Entwicklung auf Hard- und Software-Ebene angepasst worden sind, muss in den folgenden Darstellungen zeitlich etwas weiter ausgeholt werden.

¹²Das Surf-Format ist von Atlas Hydrographics als standardisiertes, plattformunabhängiges Datenformat entwickelt worden. Es wird für die Speicherung aller Rohdateninformationen (inkl. Sidescan und Backscatter) des Hydrosweep DS-2 genutzt.

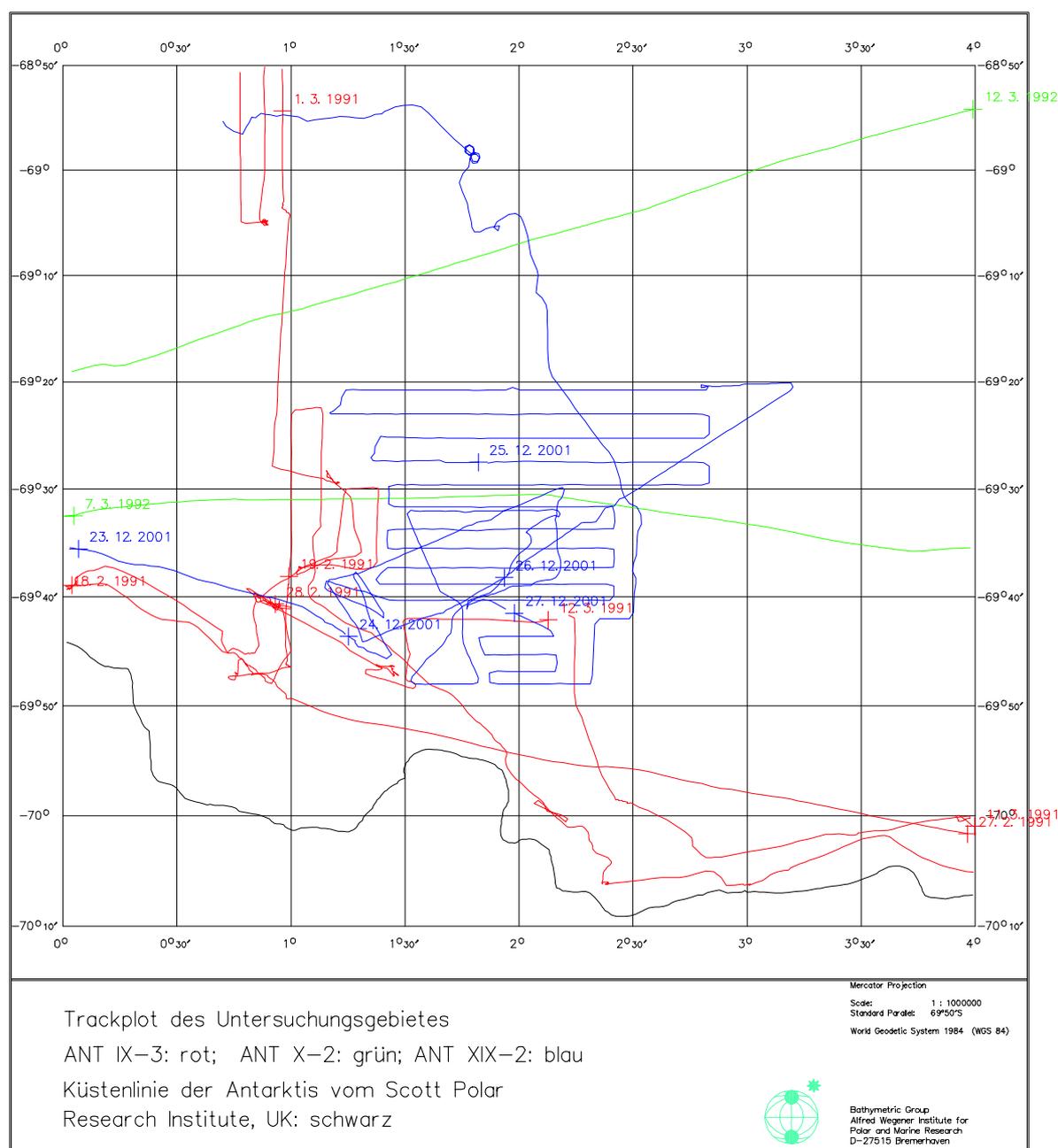


Abbildung 3.1: Trackplot der Messprofile im Untersuchungsgebiet

Während der Zeit der ersten beiden Expeditionen wurden die Hydrosweep-Daten sowohl direkt auf Magnetbänder, als auch aus Sicherheitsgründen (Back-Up) über eine serielle Schnittstelle auf einem VAX-Rechner (VMS-Betriebssystem) im Atlas-eigenen **Dux¹³-Format** gespeichert.

¹³Dux-Format: In diesem den ASCII-Konventionen entsprechende Rohdatenformat wurden bis zur Einführung des Surf-Formates die Messdaten des Hydrosweep DS-2 vorgehalten.

Das Dux-Format hält für die Herleitung der Tiefenpunkte des Fächersonars zum einen die originären Messgrößen wie Winkel und Laufzeit, zum anderen auch die sich daraus ergebenden Ablagen und dazugehörige 'lotrechte' Tiefen vor. Bei den zweitgenannten Komponenten werden schon alle benötigten Parameter wie Heave, Pitch, Roll sowie die Schallausbreitungsgeschwindigkeit des Meerwassers eingebracht. Unter Kenntnis der Position des Centerbeam und des Heading des Schiffes sind die konkreten Positionen aller Fächertiefen ableitbar.

Dabei wurden die auf dem VAX-Rechner niedergelegten Daten im Dux-Format für die weitere Navigationskorrektur verwendet. Da damals noch zwischen den nur zeitweilig vorliegenden Satellitenortungen, welche in der noch nicht völlig ausgebauten Abdeckung durch GPS-Satelliten begründet waren, gekoppelt wurde, war es mitunter sehr arbeits- und zeitintensiv, die bis zu einem Kilometer reichenden Positionsunterschiede zwischen der gekoppelten und der nächsten gefixten Position zu homogenisieren.

Im Anschluss wurden die Daten teilweise mit verschiedenen Programmen von groben Fehltiefen bereinigt oder auch in uneditierter Form als Dux-Format und mitunter auch im daraus generierten Hyd-Format auf Magnetbändern (TK50 und TK70, Vorläufern der DLT-Bänder) geschrieben, um diese Daten von Bord in das Rechnersystem am AWI übertragen zu können.

Bei dem **Hyd-Format** handelt es sich um ein vereinfachtes, speicherplatzsparendes binäres Format, welches zum zeitnahem Zugriff für alle Messfahrten des FS 'Polarstern' innerhalb der Bathymetriegruppe vorgehalten wird.

Ein Nachteil des Hyd-Formates besteht darin, dass in ihm die gemessenen Wassertiefen des Fächers in Ablagen und dazugehörige Tiefen bezogen auf die Position des Centerbeams eines Swath für die einzelnen 59 Pre-Formed Beams des Hydrosweepfächerlotes vorgehalten werden und nicht mehr, wie in Rohdatenformaten wie z.B. dem Surf- oder Dux-Format, aus den tatsächlich gemessenen Komponenten des Winkelbetrags und der Laufzeit abgeleitet werden.

Hinzu kommt, dass die Tiefen auf eine mittlere Referenzschallgeschwindigkeit für das Ausbreitungsmedium Meerwasser von 1500 m/s reduziert werden und somit keine 'wahren' Tiefenwerte vorliegen.

3.2 Messdatenaufbereitung

3.2.1 Fehlereinflüsse bei Fächerlotmessungen

Fächersonarmessungen sind den verschiedensten Fehlereinflüssen unterworfen, die einen zufälligen und systematischen Charakter aufweisen. Die Qualität der Messergebnisse hängt neben der Qualität der Positionierung dabei maßgeblich von den Rückstreuungseigenschaften des Meeresbodens und den hydroakustischen Verhältnissen in der Was-

säule entlang des Schallstrahls ab. Des Weiteren können sich das Störpotenzial des Schiffes und anderer hydroakustischer Messsysteme negativ auf Empfangsbedingungen der reflektierten Schallwellen auswirken (Schenke, 1992). Ein allgemeiner Überblick über mögliche Fehlerquellen ist in Tabelle 3.1 gegeben.

Tabelle 3.1: Zusammenstellung möglicher Fehlereinflüsse einer Fächersonarmessung (Schenke, 1992)

Systematische und zufällige Fehler
Roll- und Pitchfehler
Refraktionsfehler der Schrägstrecken
Orientierungsfehler der Wandler Elemente
Positionsfehler des Schiffes
Höhenfehler
Kreisel- und Richtungsfehler
Omega-Effekt
Tunnel-Effekt
Gierfehler
Interferenzen durch Schiffs-Noise
Interferenzen durch andere hydroakustische Messsysteme
Fehler in der Refraktionskorrektur
Rückstreuungseigenschaften des Meeresbodens
Eindringen des Vertikalbeams in den Meeresboden
Äussere Störungen der Messung
Luftblasen
Eisbrocken
Hydroakustische Fremd- und Eigengeräusche

3.2.2 Prozessierung mit Caris Hips

Die Prozessierung der Fächerlotdaten erfolgte mit dem Programm Caris Hips¹⁴ 5.2 unter Windows, eine Weiterentwicklung der HDCS¹⁵-Software, welche für das Arbeiten mit SUN-Workstations (Unix-Betriebssystem) entworfen wurde. Dieses Programmsystem ermöglicht mit Hilfe von interaktiven und automatisierten Bearbeitungsmethoden eine systematische Fehlerbereinigung von Fächersonardaten.

Wie aus der Tabelle 3.1 hervor geht, müssen bei einer Fächersonarmessung etliche Parameter verschiedener anderer Sensoren berücksichtigt werden, von denen jeder mit Feh-

¹⁴Hips steht für Hydrographic Information Processing System. Es ist ein Modul aus Caris (Computer Aided Resource Information System), welches für die Prozessierung von Fächersonardaten der verschiedensten Hersteller entwickelt wurde.

¹⁵HDCS steht für Hydrographic Data Cleaning System und kann im *Calibration Mode* auch innerhalb von Caris Hips genutzt werden.

lern behaftet sein kann, welche die Bestimmung der Tiefenwerte einer Messung beeinflussen. Beim Konvertieren der Hydrosweep-Daten in das spezifische Hips-Datenformat werden für jeden in dem jeweiligen Format aufgeführten Sensor bzw. Parameter eigene Dateien angelegt.

Dieser modulare Aufbau innerhalb von Caris Hips erlaubt es somit, jeden Parameter unabhängig voneinander zur Überprüfung darzustellen und ggf. Fehler zu bereinigen. Da die verwendeten Daten in unterschiedlichen Ausgangsformaten (Hyd- und Surf-Format) vorlagen, hatte dies verschiedene Wege der Prozessierung in Caris zur Folge.

Die Daten der Fahrten ANT IX-3 und ANT X-2, die ausschließlich in dem AWI-internen Hyd-Format zur Verfügung standen, mussten in HDCS eingelesen werden, wohingegen die Surf-Daten der Expedition ANT XIX-2 direkt auf der PC-Version in das Caris-Format konvertiert werden konnten.

Aufgrund des gleichen Formataufbaus von HDCS und Hips konnten die Daten der unterschiedlichen Ausgangsformate in ein gemeinsames Hips-Projekt auf dem PC zusammen angelegt werden.

3.2.3 Positionsdatenbereinigung

Die Bereinigung der Positionsdaten wird üblicherweise schon während der Expeditionen an Bord von FS 'Polarstern' in Hydromap Offline, der auf die originären im Surf-Format vorliegenden Messdaten zugreifende Auswertesoftware für Fächerlotmessungen von STN Atlas, durchgeführt. Somit liegen neben den früheren Fahrten ANT IX-3 und ANT X-2 (siehe Abschnitt 3.1) auch die Daten der Fahrt ANT XIX-2 bereits in navigationsbereinigter Form vor.

Bei genauerer Betrachtung der Schiffstracks in Caris Hips zeigte sich jedoch bei den Daten der ANT XIX-2 aus dem Dezember 2001 und somit nach dem Abschalten der Selective Availability ein unruhiges Verspringen der Hydrosweep Navigation in Größenordnungen von 20 bis 30 m (siehe Abbildung 3.3). Da dies schon außerhalb der zu erwartenden Genauigkeiten lag, wurde es notwendig innerhalb der Messkonfiguration, die bereits im Abschnitt 2.7 dargelegt wurde, nach möglichen Ursachen zu suchen.

Eine mögliche Ursache für die sprunghaften Navigationsdaten der Fächerlotdaten wurde darin vermutet, dass der Nautiker auf der Brücke den qualitativ geringer einzustufenden Leica-Einfrequenz-GPS-Empfänger anstelle des Trimble-Empfängers in Verbindung des MINS-Inertial-System als Eingangssensor für das NACOS-Navigationssystem gewählt haben könnte.

Da in der PODAS-Datenbank die originären Positionen aller GPS-Antennen sowie die der aktiven MINS vorgehalten werden, war es möglich die Tracklinien der einzelnen Sensoren mit den Positionen der Hydrosweep-Aufzeichnungen zu vergleichen. Zu die-

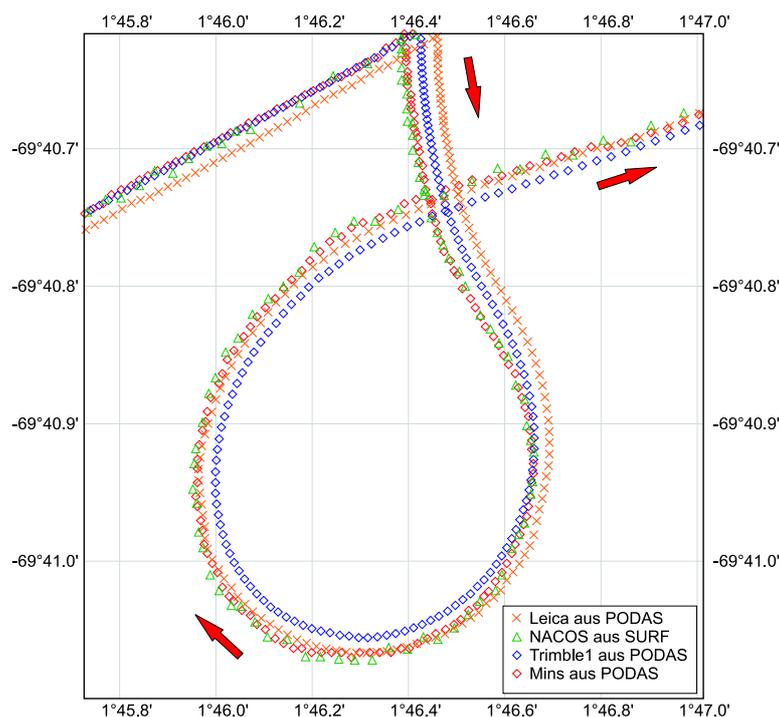


Abbildung 3.2: Darstellung der Trackplots der Sensoren Trimble1 (blau), Leica (orange) und der gefilterten Positionsdaten aus NACOS (grün) und der MINS (rot)

sem Zweck wurden die geographischen Koordinaten der GPS-Antennen, sowie die auf sich zentrierte Position der MINS im Sekundentakt aus der PODAS-Datenbank extrahiert und für die weitere Untersuchung graphisch dargestellt. Unter Hinzunahme der Hydrosweep Positionen ist es aber nicht sicher zu deuten, worauf die sprunghafte Tracklinie des Fächerlotes zurückzuführen ist.

Wie aus der Abbildung 3.2 hervor geht, beschreibt die Tracklinie der Leica-Positionen einen unruhigeren Verlauf als es bei den Daten der MINS oder dem gewählten Trimble-Empfänger der Fall ist. Eine hinreichende Ursache für die wesentlich inhomogeneren Profillinien, welche mittels der NACOS-Anlage an das Fächersonar übertragen worden sind, kann darin aber nicht als eindeutig begründet werden. Dieser Eindruck bestätigte sich bei der Betrachtung der gemeinsamen Navigationsverläufe aller Positionierungssensoren in anderen Bereichen des Untersuchungsgebietes.

Trotz keiner konkreten Lokalisierung der Fehlerquelle erschien das Ersetzen der bisherigen Navigation der Hydrosweep Profile als sinnvoll. Auch wenn die dabei auftretenden Versätze des Kurses von 20 m bis 30 m hinsichtlich der in dem Messgebiet zu erwartenden Dimensionen der Footprints von ca. 100 m bis 400 m als gering angesehen werden können, ist darauf hinzuweisen, dass eine sichere und stabile Positionierung, so wie eine Minimierung von systematischen Fehlereinflüssen im Allgemeinen, zu einer Qualitätssteigerung der Gesamtmessung beiträgt.

Somit sollte die MINS Position, die aufgrund des integrierten predizierenden Positionsfilters die ungenauere originäre Hydrosweep Navigation ersetzen.

Über den *generic data parser* können Dateien, welche wie die aus PODAS extrahierten Kurse der einzelnen Positionssensoren im ASCII-Format vorliegen, in Caris Hips eingelese und die Navigation innerhalb des Projektes ersetzt werden.

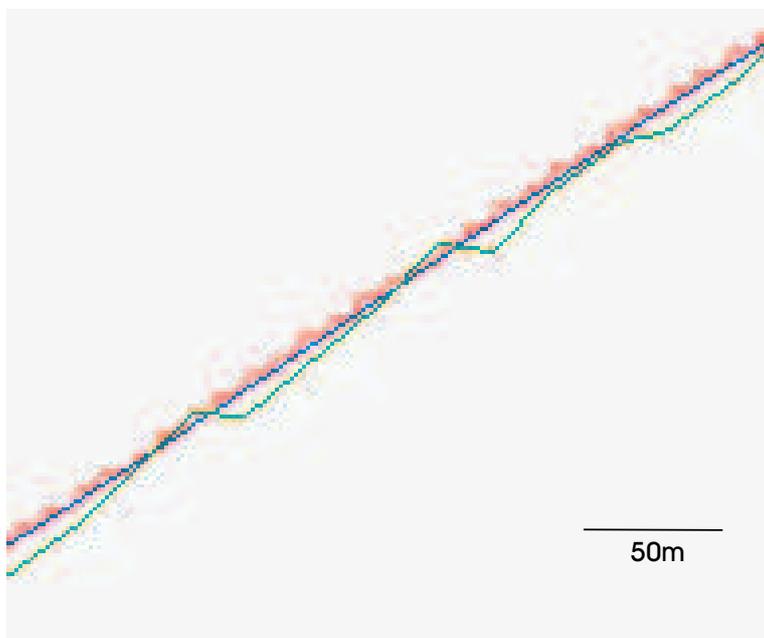


Abbildung 3.3: Darstellung des Verlaufes der Tracklinien der originären NACOS-Navigation der Surf-Daten (grün), den MINS-Positionsdaten aus PODAS (rot) und der Trimble1-Ortung aus PODAS (blau)

Da die neu hinzugeladenen MINS Ortungen nicht wie bei der NACOS Navigationsanlage schon auf die Mitte des Hydrosweep Querschwingers bezogen sind, müssen diese nun durch das Eintragen der MINS-Offsets aus dem Schiffkoordinatensystem in das *VesselConfigFile* von Hips zentriert werden.

Beim näheren Betrachten der MINS Tracklinien, welche in 1 Sekunden Intervallen in das Hips Projekt eingebracht wurden, zeigte sich allerdings insbesondere bei Kurvenfahrten, dass die Positionen den Richtungsänderungen nur stufenweise folgten (siehe Abbildung 3.3).

Während der Expedition ARK XIX-1 wurde auf FS ‘Polarstern’ die Konfiguration der Navigationselemente durch ‘FIELAX, Gesellschaft für wissenschaftliche Datenverarbeitung mbH’ mit Sitz in Bremerhaven überprüft, wodurch Erkenntnisse über mögliche Unstimmigkeiten bei der Positionierung mit der MINS gewonnen werden konnten. Ergebnisse dieser Nachforschungen sind, dass zum einen die Stufen bei den aus PODAS

extrahierten MINS Positionen darin begründet sind, dass beim NMEA-Telegramm von der MINS an PODAS die Positionen in Radiant mit einer Genauigkeit von 6 Dezimalstellen übergeben werden, was einer Auflösung von 6.3m entspricht. Zum zweiten sind die Zentrierungselemente bei der MINS mit einem systematischen Fehler behaftet gewesen, der bei Betrieb der MINS als aktiver Positionierungssensor auch an die Hydrosweep-Position weitergegeben wird. Dieser liegt in der Größenordnung von 30 m bis 40 m.

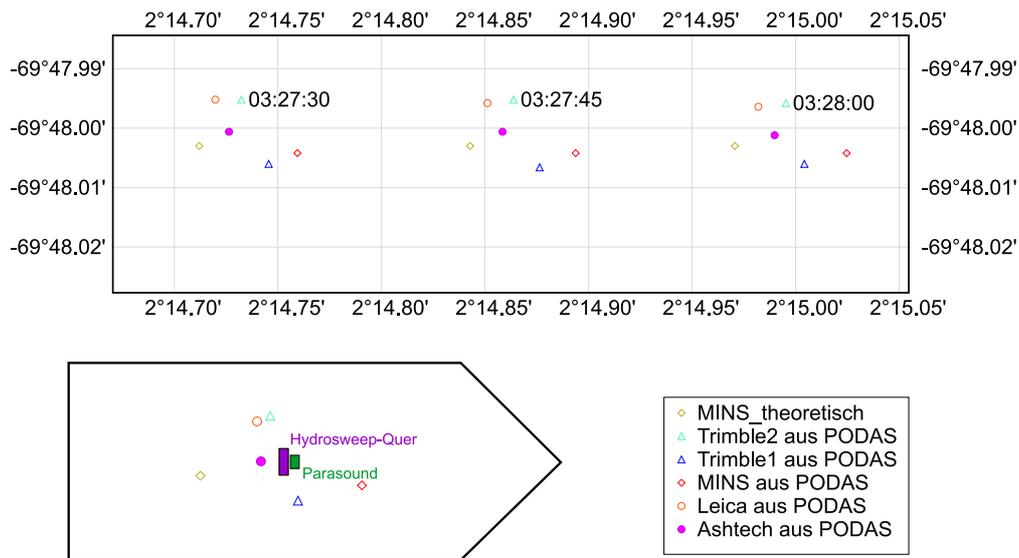


Abbildung 3.4: Beispiel der falsch berechneten MINS-Position

Bei der Darstellung der Trackverlaufes der verschiedenen Positionssensoren mit einem ausgedünnten Datensatz (15 Sekunden Intervalle) ist dies auch gut zu erkennen (siehe Abbildung 3.4).

Die dargestellten Positionssensoren sind außer der in Hips berechneten theoretischen MINS-Position nicht Roll- und Pitch-korrigiert, so dass sich die leicht schwankenden Abstände zueinander im Trackplot erklären lassen. Als Anhalt für die Orientierung des Schiffes eignen sich die Positionen der drei Zweifrequenz-GPS-Empfänger (Ashtech (lila), Trimble1 (dunkelblau) und Trimble2 (hellblau)), die zusammen ein Dreieck aufspannen. Als Hinweis auf die Dimensionierung der Darstellung kann der Abstand zwischen den beiden Trimble Antennen von ca. 20 m herangezogen werden.

Die fehlerhaft berechnete MINS-Position konnte auf die inkorrekte Eintragung der Maße für die Offsets der angeschlossenen Trimble-GPS-Empfänger in der MINS-Konfiguration zurückgeführt und korrigiert werden.

Somit wurde nun der Trimble1-Empfänger für die Positionierung des Hydrosweep-Systems über den *generic data parser* in das CARIS Projekt eingelesen und wiederum

mit Hilfe des *VesselConfigFiles* auf den Querschwinger des Fächerlotes zentriert. Nachteil bei der Wahl dieses Sensors war, dass die Positionen nicht durch einen Prädiktionsfilter korrigiert sind und einer größeren Häufung von Positionssprüngen zu rechnen war.

Wider erwartend erweist sich der Verlauf der Trimble1-Tracklinie als sehr homogen. Gerade bei Kurvenfahrten folgt sie dem Kurs über Grund sogar direkter, während die integriert-gefilterten Positionsdaten einen prädiktionsbedingten Nachschleppeffekt aufzeigen (siehe Abbildung 3.2).

3.2.4 Wasserschallkorrektur

Die Bestimmung von Wassertiefen mit hydroakustischen Systemen beruht auf der Messung der Zweiwegelaufzeit t_z , die das Signal für das Durchlaufen der Strecke bis zum Meeresboden, an dem es reflektiert wird, und zurück zum Empfänger benötigt. Um von der Schalllaufzeit auf einen konkreten Tiefenwert (z) schließen zu können, ist die Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit (c_{mean}) des Schallimpulses im Meerwasser notwendig.

$$z = \frac{1}{2} \cdot t_z \cdot c_{mean} \quad (3.1)$$

Eine fehlerhafte Annahme der örtlichen Wasserschallgeschwindigkeit hat eine falsche Tiefenberechnung zur Folge. Bei Fächerlotmessungen bewirkt dies nicht nur eine Verschiebung des Tiefenhorizontes, sondern ist aufgrund der nach außen zunehmenden Laufzeiten durch die Wassersäule für die äußeren Beams auch mit einer Deformation des Fächers verbunden.

So äußert sich eine als zu gering angenommene Wasserschallgeschwindigkeit in dem Durchbiegen des Fächers, so dass bei ebenen Meeresboden die äußeren Tiefenwerte geringer als die in der Mitte des Fächers ausfallen und so fälschlicherweise der Eindruck einer leichten Vertiefung des Meeresboden entlang des Schifftracks entsteht.

Wie schon in Abschnitt 2.5 beschrieben, wurde bei den Messungen der ANT XIX-2 im Untersuchungsgebiet der c_{mean} -Wert über die Kreuzfächerkalibrierung ermittelt. Bei Eisfahrten sind die Tiefenmessungen mit Echolotsystem starken hydroakustischen Störeinflüssen ausgesetzt, was zur Bestimmung einzelner Fehltiefen oder gar zu Ausfällen ganzer Tiefenfächer und so auch zu einer Minderung der Datenqualität führt. Dies wirkt sich ebenso auf die Berechnungen der mittleren Schallgeschwindigkeit bei der Kreuzfächerkalibrierung aus.

Abhilfe kann die Verwendung von Wasserschallprofilen (Sound Velocity Profile - SVP) bieten, die aus Daten von CTD-Profilen im Messgebiet generiert werden können.

Mit Hilfe des Programmes ODV¹⁶ lassen sich so aus den gemessenen Größen Temperatur (T), Salzgehalt (S) und den Druck (p) Wasserschallprofile errechnen.

¹⁶Ocean Data View: Ist eine am AWI entwickelte Software, um ozeanographisch relevante Messgrößen aus stationären Profilmessungen in der Wassersäule graphisch darzustellen, zu bearbeiten und aus

Die ODV Software verwendet für die Berechnung der Wasserschallgeschwindigkeit die Formel nach Chen & Millero, welche auch von der UNESCO empfohlen wird. Da diese einen wesentlich differenzierteren Aufbau aufweist, als die Gleichung 2.5 in Abschnitt 2.2, soll hier nur auf die ausführliche Schreibweise der Berechnungen im Anhang B verwiesen werden.

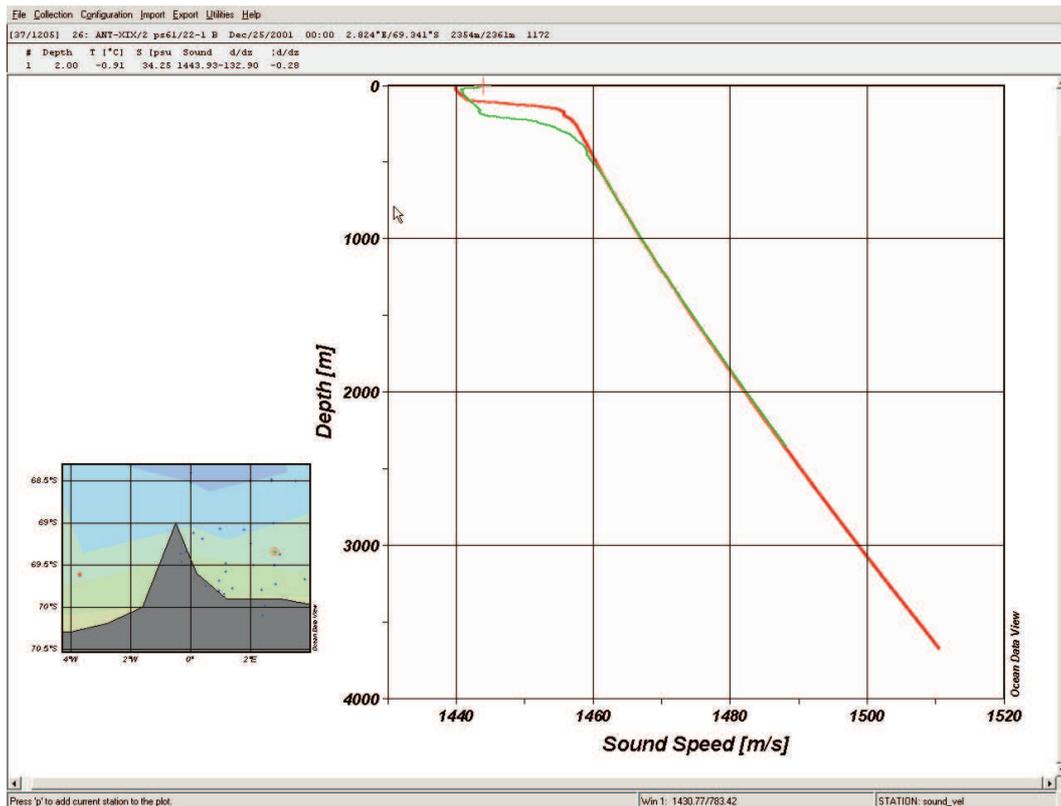


Abbildung 3.5: Darstellung der Wasserschallprofile beider CTD-Stationen ps61-22 (grün) und ps61-24 (rot) der ANT XIX-2 in ODV

Für das Anbringen der so berechneten Wasserschallprofile konnten nur die Fächerlotdaten aus dem Jahre 2001 herangezogen werden, da nur beim Konvertieren des Surf-Formates nach Hips die für die Neuberechnung benötigten originären Messgrößen Winkel und Laufzeit in die Caris-Dateien geschrieben werden. Beim Einlesen des Hyd-Formates werden nur die Ablagen mit den dazugehörigen Tiefenwerten in das HDCS-System übertragen. Gleiches gilt auch für das Dux-Format, obwohl dieses noch über die originären Messgrößen verfügt, welche aber beim Einlesen in HDCS vom Konverter nicht berücksichtigt werden.

Es konnten Daten von zwei zeit- und ortsnahen CTD-Stationen der ANT XIX-2 für ihnen Modellierungen zu erstellen.

die weitere Prozessierung der im Surf-Format nach Caris Hips eingelesenen Fächerlotmessungen für das Anbringen der Wasserschallprofile innerhalb von Caris Hips genutzt werden.

Die beiden in ODV generierten Wasserschallprofile sind in Abbildung 3.5 dargestellt. Anhand ihrer Verläufe ist ersichtlich, dass die Unterschiede zwischen den beiden Profilen im oberen Bereich der Wassersäule am größten sind. Die Oberschicht (0 - 50 m Tiefe) weist die größten Veränderungen auf, da sie am stärksten den meteorologischen Schwankungen der Atmosphäre ausgesetzt wird. Die darunterliegende Schicht – die jahreszeitliche Thermokline¹⁷ (50 - 200 m) – folgt nur noch den saisonalen Veränderungen, die ihr von der Oberschicht übertragen werden.

Schon im Bereich der Hauptthermokline (200 - ca. 500 m), die durch Temperaturänderungen mit zunehmender Tiefe gekennzeichnet ist, sind die beiden Graphen durch einen ähnlichen Verlauf gekennzeichnet. Ab etwa 500 m Tiefe ist für beide Profile erwartungsgemäß eine annähernd geradlinige Zunahme der Wasserschallgeschwindigkeit zu verzeichnen, die nur noch druckabhängig ist (Urban, 2002).

Zum Anbringen des Wasserschalls innerhalb der Hips-Software wird ein sogenanntes svp-File benötigt. Dies ist eine Datei in der Spaltenweise die Tiefe und die entsprechende Ausbreitungsgeschwindigkeit eingetragen sind. Für die Zuordnungszwecke dieser Informationen ist in der Datei für jedes eingetragene SVP eine Headerzeile vorangestellt, in der Datum, Zeit (UTC¹⁸) und wahlweise die Position in geographischen Koordinaten hinterlegt werden.

Die beiden Wasserschallprofile konnten als ASCII-Dateien aus ODV exportiert und in das svp-File eingetragen werden. Durch diese Vorgehensweise konnten in Caris Hips die Fächerlotmessungen der ANT XIX-2 mit den Wasserschallprofilen der beiden verwendeten CTD-Stationen neu berechnet werden.

3.2.5 Tiefeneditierung

In diesem Bearbeitungsschritt werden die Tiefenmessungen auf systematische Fehler überprüft und von groben Fehlmessungen befreit. Innerhalb der Hips Software gibt es verschiedene Möglichkeiten, Fächersonardaten dahingehend zu bearbeiten. Diese reichen von der Betrachtung einer einzelnen Profillinie im *Swath Editor*, über die gemeinsame lagerichtige Darstellung von Tiefenpunkten mehrerer Nachbarprofile im *Subset Mode* bis hin zur automatisierten Bereinigung von Ausreißern mittels statistischer Analyseverfahren mit Hilfe des *Surface Cleanings*.

Da es sich bei dem Untersuchungsgebiet um ein sehr stark bewegtes Gelände handelt,

¹⁷Thermokline: Eine Wasserschicht mit einem starken Temperaturgradienten.

¹⁸UTC: Universal Time Coordinated ist die auf Basis der Festlegung der Sekunde durch eine atomare Schwingung des Cäsium 133 definierte Zeit, die sich auf das Meereshöheniveau und den Nullmeridian bezieht. Aufgrund des Hinzufügens von Schaltsekunden ergeben sich Differenzen zur GPS-Zeit.

wird von der Bearbeitung mit Hilfe des Swath-Editors abgesehen, da in ihm feine Strukturen nur schwer nachzuverfolgen sind und es schnell zu Fehlinterpretationen kommen kann. Hinzu kommt die Tatsache, dass sich stellenweise ein großer Anteil von Fehltiefen ergeben hat, die wahrscheinlich durch schlechte Signal-Rausch-Verhältnisse infolge von Eisfahrten begründet sind und somit zu einer zusätzlichen Unübersichtlichkeit des Geländeverlaufes durch die Darstellung aufeinanderfolgender Fächer beigetragen hätte.

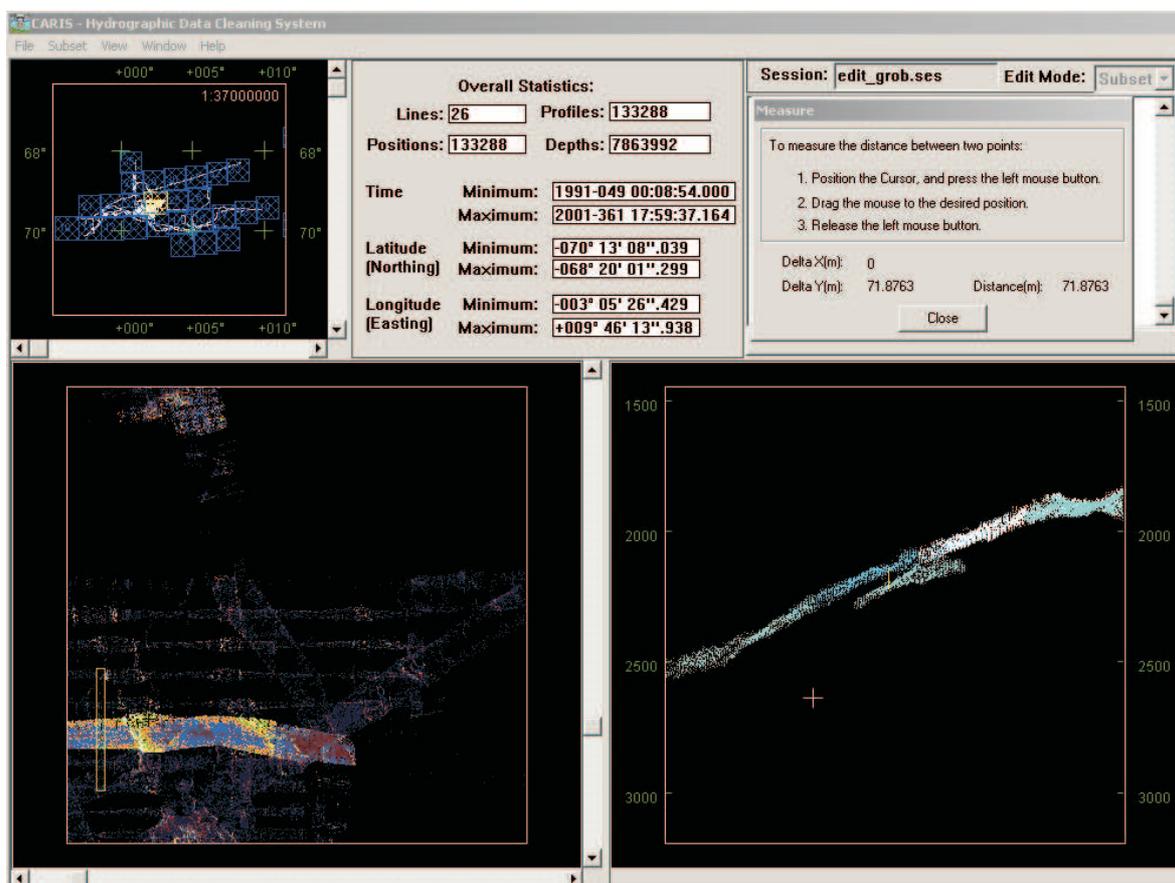


Abbildung 3.6: Gemeinsame Darstellung der Fächersonardaten des Hyd- und Surf-Formates in HDCS vor der Tiefenbereinigung

Ein Argument für das Nutzen des *Swath Editors* für die Tiefeneditierung hingegen ist, dass ein kompletter Fächerausfall durch das Betrachten der einzelnen aufeinanderfolgenden Lotungen sehr schnell und eindeutig zu erkennen ist und eliminiert werden kann. Für die Bearbeitung von einzelnen Profildfahrten kann eine solche Vorgehensweise eine zeitsparende Variante darstellen. Für flächenhaft vermessene Gebiete jedoch sollte eine Tiefeneditierung mit dem *Swath Editor* allerdings nur einen ersten Arbeitsschritt bei der Prozessierung von Fächersonardaten darstellen, da mit ihm keinerlei profilübergreifende Betrachtung der Messungen möglich ist.

Dafür bietet sich der *Subset-Mode* an, mit dem die gemergten¹⁹ Profile in richtiger Lagendarstellung zueinander betrachtet und editiert werden können. Dies ist insbesondere bei systematisch vermessenen Gebieten mit Überdeckung der Profillinien, bei Kurvenfahrten, oder auch beim Driften des Schiffes im Stationsbetrieb der Tiefeneditierung innerhalb des *Swath Editors* vorzuziehen, da ein besserer Gesamtüberblick über die Morphologie des Messgebietes vermittelt wird.

Durch die gemeinsame Darstellung aller Tiefenmessungen der drei Expeditionen (siehe Abbildung 3.6) ergeben sich aufgrund der normierten Tiefenwerte der im Hyd-Format eingelesenen Daten der Fahrten ANT IX-3 und ANT X-2 im Überdeckungsbereich mit denen aus dem Surf-Format konvertierten Messungen der Fahrt ANT XIX-2 Unterschiede der Tiefenhorizonte. Im rechten unteren Fenster der Abbildung 3.6 sind die Tiefenunterschiede, die in einer Wassertiefe von etwa 2500 m um die 70 m betragen, eindeutig zu erkennen.

Innerhalb von HDCS besteht die Möglichkeit sich die Verteilung der Standardabweichung der Messwerte in einem *Subset* anzeigen zu lassen. Es wird ein Gitter berechnet, in dem jeder Tiefenpunkt mit einem Wert für die Standardabweichung versehen wird, der aufgrund der Verteilung der in der Rasterzelle vorhandenen Tiefenpunkte ermittelt wird. Die Standardabweichung wird für die Rasterzellen farbcodiert dargestellt, wobei ein hoher Wert mit einer helleren Farbe versehen wird (Caris, 1998).

Der Trackverlauf der im Hyd-Format eingelesenen Expedition ANT X-2 hebt sich aufgrund der in dem Tiefenunterschied begründeten hohen Standardabweichung deutlich von den nicht normierten Tiefendaten der Fahrt ANT XIX-2 ab, wie in der Abbildung 3.6 im linken unteren Fenster gut zu erkennen ist. Diese Tiefenunterschiede hatten zur Folge, dass die Messdaten der Expeditionen ANT XIX-2 getrennt von den im Hyd-Format vorliegenden Fahrten im *Subset Editor* von HDCS bearbeitet werden müssen.

Des Weiteren ist in Abbildung 3.6 auch das Messrauschen in den Überlappungsbereichen der systematischen Vermessung aus dem Dezember 2001 im Standardabweichungsbild als in Ost-West-Richtung verlaufenden weißen Streifen zu erkennen.

Für die Bereinigung der groben Fehltiefen konnte die *Depth Classification* angewendet werden, mit der Tiefenwerte, welche eine besonders hohe Standardabweichung besitzen, automatisch eliminiert werden können (Caris, 1998). Mit einer Rastergröße (*Resolution*) von 200 m, einem Suchradius von 2 Pixeln und den Standardinstellungen für die restlichen relevanten Parameter (siehe Tabelle 3.2) konnten im Untersuchungsgebiet gute Ergebnisse erzielt werden.

Die Einstellung des *Classification Levels* wird interaktiv so gewählt, dass nur eindeutig fehlerhafte Punkte gelöscht werden und keine Löcher in den Tiefendaten entstehen. Dabei kann zwischen sieben verschiedenen Abstufungen unterschieden werden (siehe

¹⁹Durch das *Mergen* werden die modular vorgehaltenen und editierbaren Parametereinträge der einzelnen Hips-Dateien über die Zeit zur Berechnung von Tiefenpunkten miteinander verschmitt.

Tabelle 3.2: Parameter für die Tiefenbereinigung mit Hilfe der *Auto Classification* in HDCS

Resolution	200 m
Radius	2 Pixel
Base Scale	0
Level Scale	1
Offset	0
Classification Level	3 - 6

Abbildung 3.7), wobei mit kleiner werdender Zahl auch Punkte mit geringerer Standardabweichung ausgewählt werden. Mit der Stufe Null werden keine Tiefenpunkte markiert. Die so angewählten Punkte blinken in den beiden Anzeigefenstern auf, so dass anhand dieser Anzeige die Einstellungen der *Classification Levels* überprüft werden und ggf. korrigiert werden können, bevor die klassifizierten Punkte gelöscht werden.

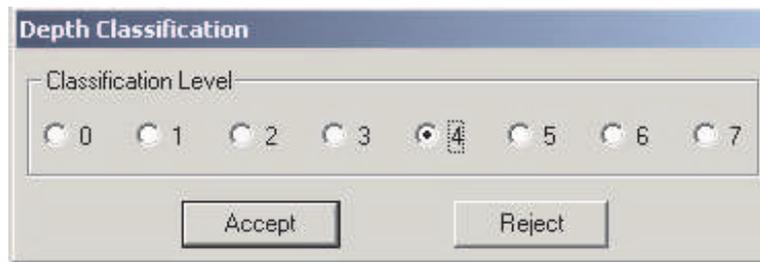


Abbildung 3.7: Dialogfenster zum Festlegen des *Classification Levels* in HDCS

Dieser Vorgang kann inklusive einer Neuberechnung der Standardabweichung iterativ wiederholt durchlaufen werden, bis ein optimales Ergebnis erhalten worden ist. Die *Depth Classification* ist aber nur begrenzt einsetzbar, da in Bereichen großer Tiefenunterschiede oder geringer Punktdichte es zu sehr starken bzw. kaum merkbaren Auswirkungen der automatisierten Tiefenbereinigung in HDCS kommt. Dies ist einerseits bei steilen Geländeformen in der folgerichtig hohen Standardabweichung der Punkte und andererseits in der nicht aussagekräftigen Wertbestimmung der Standardabweichung aufgrund zu wenig eingebrachter Datenpunkte begründet.

Die eingestellten Parameter der *Depth Classification* sind den jeweiligen Gegebenheiten der Tiefendaten interaktiv anzupassen. Dies ist insbesondere bei den flacheren Bereichen der Messungen am Kontinentalschelf zu berücksichtigen. Eine ausführliche Beschreibung dieser automatisierten Form der Tiefendatenbereinigung ist in der HDCS-Programmbeschreibung zu finden (Caris, 1998).

Die bis zu diesem Zeitpunkt grob vorbereinigten Messdaten sind anschließend im HDCS-*Subset Editor* manuell editiert worden. Zu diesem Zweck wurden flächendeckend Subsets einer Seitenlänge von etwa 10 km und einem Überlappungsbereich von 5 % angelegt,

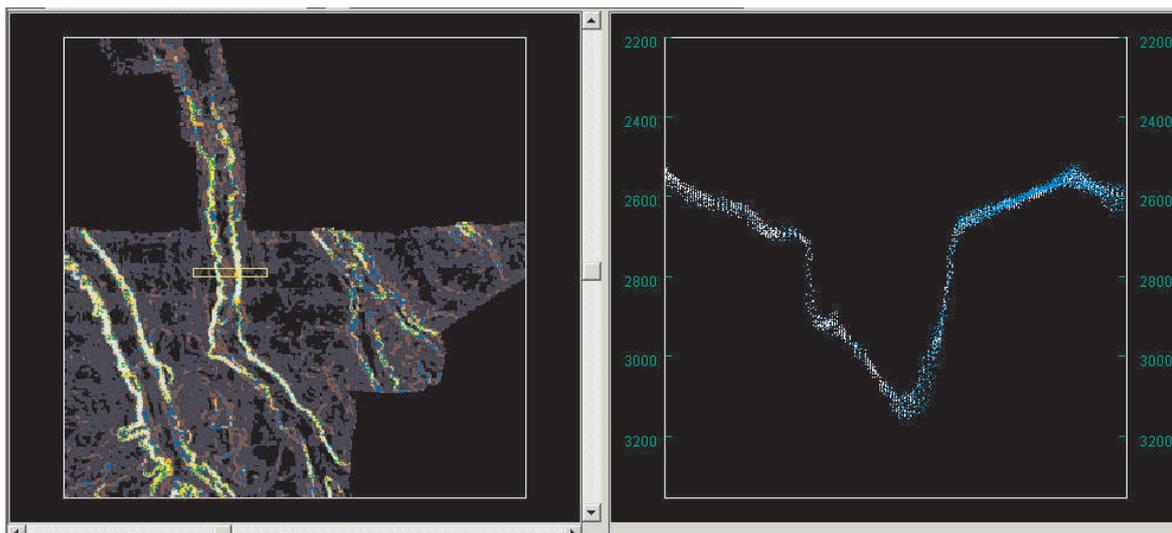


Abbildung 3.8: Darstellung des gleichen Subsets aus Abbildung 3.6 in HDCS nach der Tiefenbereinigung

die systematisch auf Fehltiefen überprüft worden sind. Es ist sinnvoll die Subsets in Richtung des stärksten Geländegefälles streifenweise durchzuschauen, da so fehlerhafte Tiefenpunkte am deutlichsten hervortreten. Gegebenenfalls ist es auch erforderlich das Subset abhängig von der Morphologie des Meeresbodens neu auszurichten.

Das Endresultat der manuellen Tiefenbereinigung im *Subset-Mode* ist beispielhaft in Abbildung 3.8 dargestellt. Es zeigt das gleiche *Subset* (mit einer Seitenlänge von etwa 60 km) wie in Abbildung 3.6 ohne die im Hyd-Format eingelesenen Daten der Fahrten ANT IX-3 und ANT X-2. In der Darstellung der Standardabweichung (Abbildung 3.8 links) sind nur noch die morphologischen Strukturen des Meeresbodens zu erkennen, welche sich aufgrund des starken Geländegefälles abzeichnen und vor der Bereinigung (Abbildung 3.6) nur sehr schwach zu erahnen waren.

Die plausibilisierten Daten werden expeditionsweise im ASCII-Format aus Caris Hips ausgelesen. Um die im Surf-Format eingebrachten Daten der Fahrt ANT XIX-2 den Tiefenmessungen der beiden anderen im Hyd-Format vorliegenden Expeditionen hinsichtlich des Tiefenhorizontes anzugleichen, konnten die erstgenannten mit Hilfe des AWI-interne Programmes *depth2sound.pl* (Gauger, 2002) auf 1500 m/s normiert werden.

Als Ergebnis der prozessierten, bathymetrischen Messungen liegen die bereinigten Daten aller drei Fahrten (ANT IX-3, ANT X-2 und ANT XIX-2) als Koordinatentripel bestehend aus den geographischen Koordinaten des Tiefenwertes in Dezimalgrad und der auf 1500 m/s normierten Wassertiefe im ASCII-Format vor. Diese Dateien stehen für die anschließenden Auswertungsschritte als Ausgangsdatensatz zur Verfügung.

3.3 Arbeitsschritte in ArcInfo

3.3.1 Koordinatentransformation

Die Berechnung des Digitalen Gelände Modells (DGM) wurde mit Hilfe des Geographischen Informationssystems ArcInfo durchgeführt. Dieses umfangreiche Softwarepaket der Firma ESRI Geoinformatik GmbH bietet zahlreiche Möglichkeiten, Geodaten darzustellen, miteinander zu verschneiden und umfassende Analysen durchzuführen sowie die Ergebnisse zu visualisieren.

Für die Berechnung des Modells war es notwendig, die in ellipsoidischen Koordinaten vorliegenden Messpunkte in ein kartesisches Koordinatensystem zu transformieren, um die Berechnung eines regelmäßigen metrischen Rasters zu ermöglichen. Aufgrund der nicht zu polnahen Lage des Messgebietes konnte die Mercator-Abbildung gewählt werden, die aufgrund der Winkeltreue besonders gut für die Darstellung der in Ost-West-Richtung gefahrenen Profile der systematischen Vermessung in dem Arbeitsgebiet geeignet ist.

Der längentreue Parallelkreis mit $69^{\circ} 30' S$ und der Referenzmeridian mit $2^{\circ} 00' E$ wurden so gewählt, dass sie jeweils mittig durch das gesamte Messgebiet verlaufen, um die Verzerrungen der Strecken und Flächen auch in den Außenbereichen möglichst gering werden zu lassen. Die Projektion der im ASCII-Format aus Caris exportierten Koordinaten wurde in ArcInfo mit dem Befehl *project* unter der Zuhilfenahme einer Projektions-Datei durchgeführt. In dieser Datei sind die notwendigen Angaben der Eingangsprojektion und die Parameter der Ausgangsprojektion enthalten. Anschließend wurde die projizierte ASCII-Datei mit Hilfe von AWK²⁰-Befehlen in das zum Einlesen in ArcInfo vorgegebene *Generate*-Format gebracht, um mit der Gridberechnung fortfahren zu können.

3.3.2 Gridberechnung

Zur Berechnung der Rasterpunkte des Geländemodells wurde das gewichtete lineare Interpolationsverfahren namens Inverse Distance Weighting (IDW) ausgewählt, da sich dieses für die Verarbeitung von Daten mit inhomogener Stützpunktdichte eignet und dessen Anwendung für Gebiete mit ähnlichen morphologischen Strukturen innerhalb der AWI-Bathymetrie-Gruppe schon zu guten Ergebnissen geführt hat.

Die Auswahl der Messpunkte, welche zur Berechnung der Rasterpunkttiefe einer Rasterzelle berücksichtigt werden, ist bei der IDW-Interpolationsfunktion hauptsächlich über zwei Parameter regulierbar. Zum einen ist dies über das Setzen eines maximalen Radius möglich, innerhalb dessen die Datenpunkte liegen müssen, um für die Berechnung eines Rasterwertes einbezogen zu werden. Diese Vorauswahl kann dann zum anderen noch

²⁰Die Programmiersprache AWK gehört zum Standardumfang von Unix. Mit ihr können zeilenorientierte Umformatierungen, Extraktionen und auch einfache Berechnungen von ASCII-Dateien durchgeführt werden. Der Name leitet sich aus den Anfangsbuchstaben der drei Programmautoren Alfred Aho, Peter Weinberger und Brian Kernighan ab.

durch das Bestimmen einer maximalen Punktzahl eingeschränkt werden, wobei die Tiefen mit dem geringsten Abstand zum Rasterpunkt mit einer höheren Gewichtung berücksichtigt werden.

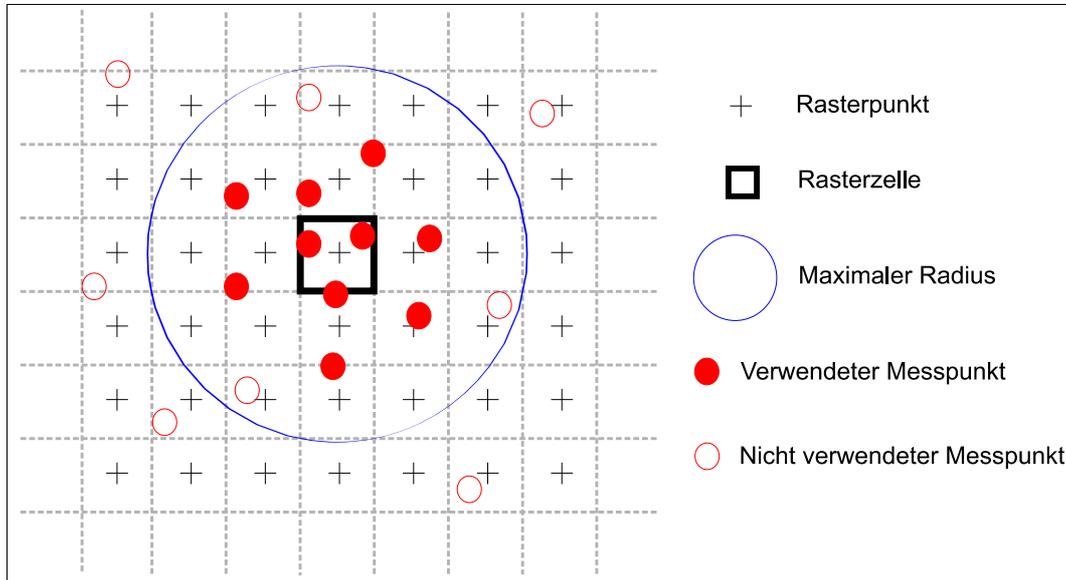


Abbildung 3.9: Interpolation des Rasterpunktwertes nach dem IDW-Verfahren unter Heranziehung von 10 Datenpunkten (Frahm, 2003)

In der Abbildung 3.9 ist die Funktionsweise der IDW-Methode schematisch dargestellt. Ein Vorteil dieses Interpolationsverfahrens ist, dass dadurch auch relativ umfangreiche Datensätze in einem angemessenen Zeitaufwand in eine DGM-Berechnung einfließen können.

Nachteil einer rein auf Koordinatentripel basierenden DGM-Berechnung ist die fehlende beamabhängige Gewichtung der Messpunkte, so dass den Tiefenwerten der Außenbeams ein ebenso großer Einfluss auf die Gridberechnung gegeben wird wie denen der Nadirrichtung, was unter hydroakustischen Gesichtspunkten nicht optimal ist (siehe Abschnitt 2.5).

Bei der Wahl der Rastergröße des Modells muss ein Kompromiss zwischen dem Ziel einer detailgetreuen Abbildung des Meeresbodens, was insbesondere bei den im Untersuchungsgebiet vorhandenen Steilhängen wünschenswert wäre, und einer sinnvollen Wiedergabe der Messergebnisse gefunden werden.

In Bezug auf den letzteren Gesichtspunkt ist es für eine sinnvolle Abschätzung wichtig zu wissen, dass die Größe des Footprint eines Preformed Beams des Hydrosweep in 2000 m Wassertiefe von 80 m in der Nadirrichtung bis 160 m am Rand des Fächers und in 5000 m Tiefe zwischen 200 m bzw. 400 m variiert.

Da sich die Rasterzellengröße nicht innerhalb eines Grids tiefenabhängig variieren lässt, wurde die Seitenlänge einer Rasterzelle mit 100 m so gewählt, dass das Modell über eine hinreichend detaillierte Auflösung verfügt und sich trotzdem noch im – wenn auch oberen – Bereich der lateralen Messauflösung des Fächersonars bewegt.

Auf die Glättung eines DGMs, die mit einem Informationsverlust gerade in sehr fein-strukturierten und/oder Gebieten starken Gefälles einhergeht, hat die Anzahl der zur Berechnung verwendeten Messpunkte sowie deren Gewichtung, als auch die maximale Entfernung zum Rasterpunkt entscheidenden Einfluss. Dabei wirkt sich ein großer Suchradius, eine hohe Anzahl von Messpunkten, die den Einfluss der weiter vom Rasterpunkt entfernten Datenpunkte erhöht, und ein geringer Gewichtungsfaktor, der die nahen Tiefenwerte gegenüber den entfernteren nur geringfügig hervorhebt in einer weiteren Glättung des Modells aus.

Tabelle 3.3: Parameter für die Berechnung mit der IDW-Methode

Rasterpunktabstand	100 m
Gewichtung	0.5
Punktanzahl	100
maximaler Radius	500 m
x-min, x-max:	-80 850, 82 550
y-min, y-max:	-3 886 220, -3 741 920

In einem hinsichtlich der Geländegestalt und des Tiefenbereichs repräsentativen Testgebiet wurden mehrere Durchläufe für die Gridberechnung mit verschiedenen Parametern des IDW-Verfahrens durchgeführt und die Isolinien-Darstellungen miteinander verglichen. Dabei bestätigten sich die letztlich gewählten Einstellungen (siehe Tabelle 3.3), welche schon bei Messgebieten mit vergleichbaren Tiefenbereichen und ähnlich bewegten Geländeformen (beispielsweise im Gebiet des Gakkel-Rückens (Gauger, 2002)) zu guten Ergebnissen führten. Diese in Tabelle 3.3 aufgeführten Parameter werden auch für das hier zu behandelnde Untersuchungsgebiet angewendet.

Das Ergebnis der etwa 10 stündigen Berechnung²¹ ist ein digitales Geländemodell mit 1443 Reihen und 1634 Spalten in einem Tiefenbereich von 152 m bis 4214 m. Dabei beträgt die Gesamtfläche der Rasterzellen, die eine Tiefeninformation enthalten, ca. 7800 km².

²¹Die Berechnung ist mit einer SUN-Workstation vom Typ Blade 100 (CPU:UltraSPARC-IIe 500 MHz, RAM: 1GB SDRAM) durchgeführt worden

3.3.3 Glättung des Geländemodells

Da die aus dem berechneten DGM abgeleiteten Isolinien insbesondere in Bereichen geringerer Hangneigungen (Kuppen und Talsohlen) einen unruhigen Verlauf aufwiesen, wurde von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, das Geländemodell hangneigungsabhängig mit verschiedenen Filter-Matrizen zu glätten.

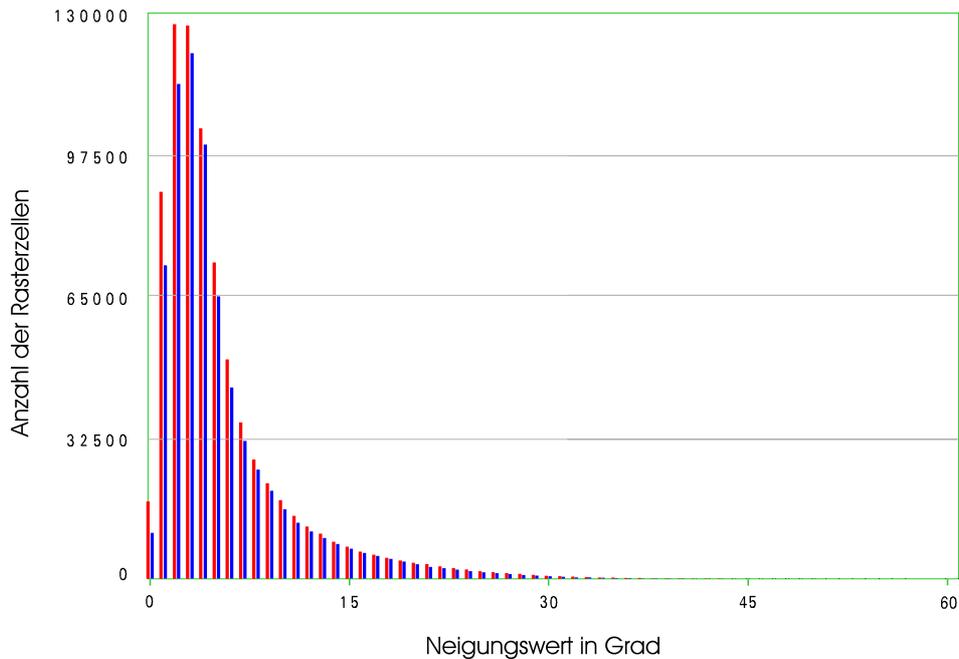


Abbildung 3.10: Histogramm: Verteilung der Hangneigung im ungeglätteten (rot) und gebläuteten (blau) Geländemodell

Dazu muss zuerst ein Überblick über die Verteilung der Hangneigungen innerhalb des DGMs verschafft werden. Zu diesem Zweck kann mit Hilfe der ArcInfo-Funktion *slope* ein Neigungsgrid aus einem digitalen Geländemodell abgeleitet werden. Die auftretenden Neigungswerte pro Rasterzelle und deren Häufigkeitsverteilung im Ausgangsmodell (rot) ist in einem Histogramm (Abbildung 3.10) dargestellt.

Für die Einteilung in verschiedene Neigungsklassen und die Zuordnung der dazugehörigen Filter-Matrizen konnte wiederum auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Dabei werden bei Gebieten mit starker Hangneigung kleinräumige Filter angewendet, um die Geländeformen zu erhalten und bei den Gebietsteilen geringer Hangneigung großräumigere Matrizen.

Zum Testen der Filtereinstellungen werden wiederum im Testgebiet mehrere Durchläufe mit unterschiedlichen Hangneigungsklassen und entsprechender Zuordnung von Filtermatrizen durchgeführt, wobei die Ergebnisse anhand der Isolinienverläufe miteinander

Tabelle 3.4: Die für die Glättung des Grids verwendeten Hangneigungsklassen und Filtermatrizen

Klasse	Hangneigung	Filtermatrize	
1	$> 35^\circ$	3x3	binominal
2	$20^\circ - 35^\circ$	3x3	mittelwert
3	$10^\circ - 20^\circ$	5x5	binominal
4	$5^\circ - 10^\circ$	7x7	binominal
5	$< 5^\circ$	9x9	binominal

verglichen werden.

In Abbildung 3.11 sind die Isolinienverläufe des ungeglätteten und geglätteten DGM gegenübergestellt. Es ist leicht ersichtlich, dass die neu abgeleiteten Isolinien (rot) in ihrem Verlauf homogener sind. Da bei der Neuberechnung des geglätteten Gitters Rasterzellen, denen innerhalb der zur Berechnung angewendeten Filtermatrix eine Zelle ohne Tiefeninformation zugeordnet wurde, auch ohne dazugehörigen neuen Tiefenwert in das geglättete Gittermodell eingehen, verliert das geglättete Modell in den Randbereichen an Rasterzellen, die Tiefeninformationen enthalten. Es folgt daraus, dass die erneut abgeleiteten Isolinien auch zum Rand des vermessenen Gebietes gestutzt werden.

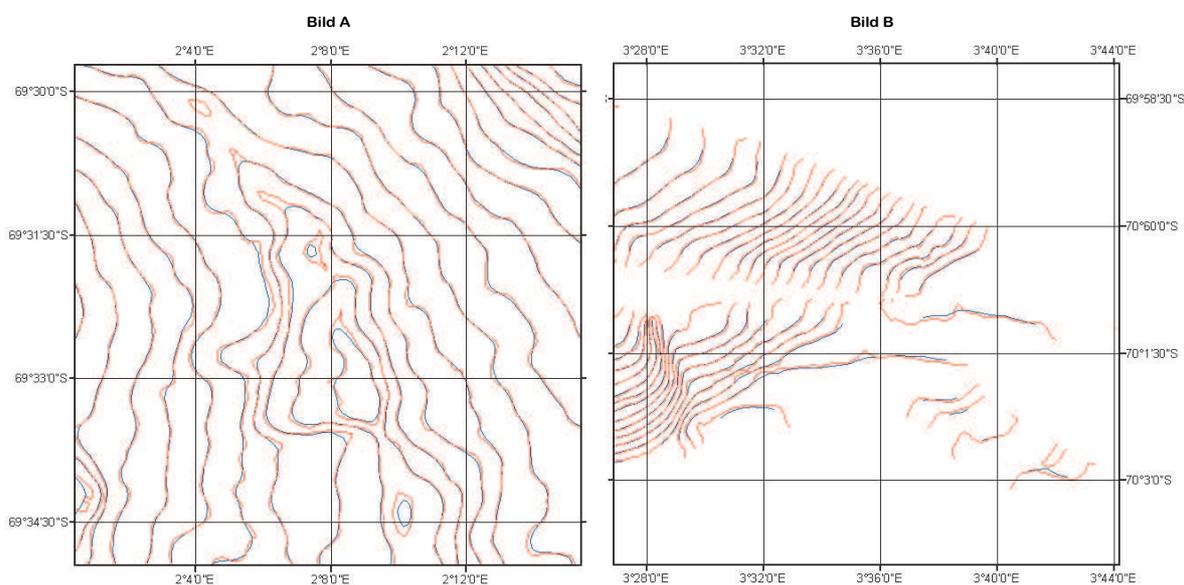


Abbildung 3.11: Vergleich der Isolinien aus dem ungeglätteten (rot) und dem geglätteten Geländemodell (blau) mit einer Äquidistanz von 50 m.

Besonders nachteilig wirkt sich dies auf die einzeln gemessene Linien in flachen Bereich

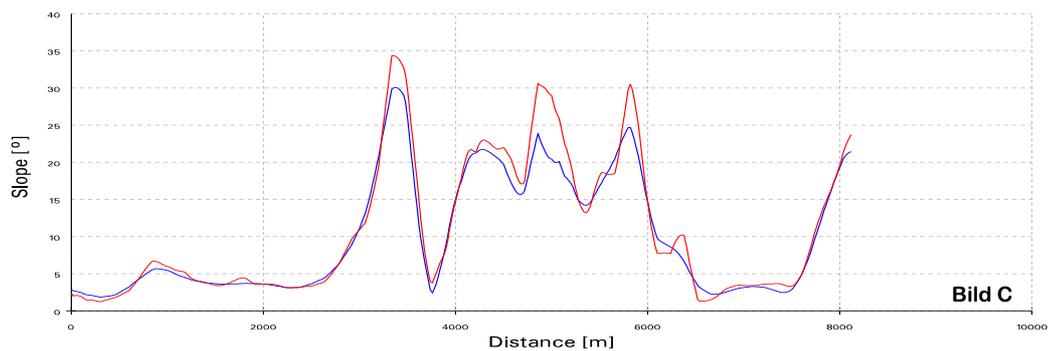
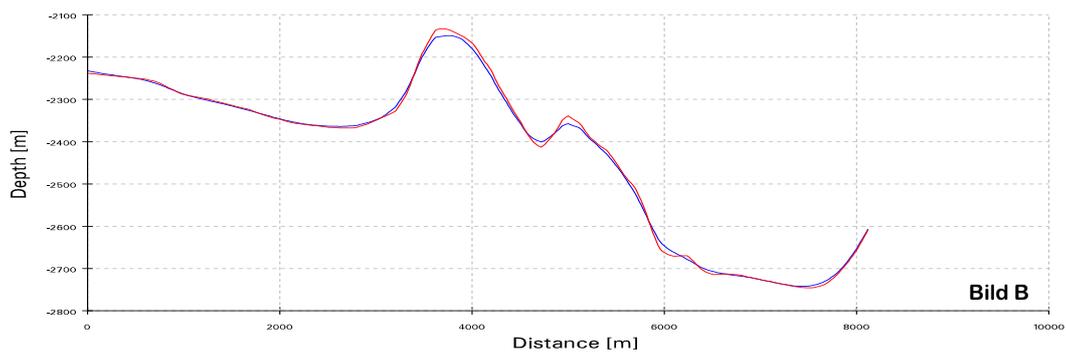
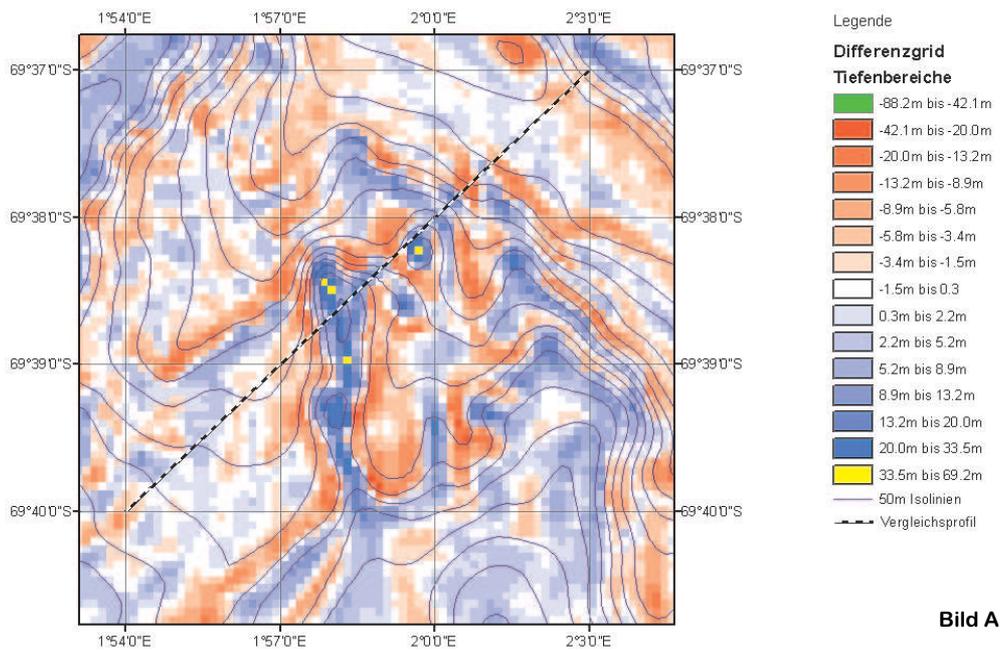


Abbildung 3.12: Darstellungen zur Untersuchung des geglätteten DGMS. Bild A: farbcodierte Darstellung eines Ausschnittes des Differenzgrids (Zunahme = rot, Abnahme = blau/gelb) mit Vergleichsprofil (gestrichelte Linie); Bild B: Vergleich des Tiefenprofils (ungeglättet = rot, geglättet = blau); Bild C: Vergleich des Neigungsgrids (Farben wie Bild B)

des Kontinentalschelfs aus, da dort die Isolinien teilweise um mehr als die Hälfte gekürzt werden (siehe Bild B in Abbildung 3.11).

Die hangneigungsabhängige Glättung des Geländemodells bringt neben der beabsichtigten Minimierung des verbliebenen Messrauschens für einen homogeneren Verlauf der aus dem DGM abgeleiteten Isolinien den Nachteil mit sich, dass feine Oberflächenstrukturen und morphologische Details nur noch undeutlich abgebildet werden.

Um die Auswirkungen näher zu untersuchen, wurde in ArcInfo ein Differenzgrid gebildet, indem das geglättete von dem ungeglätteten Gittermodell abgezogen worden ist. In Abbildung 3.12 sind die Differenzwerte der einzelnen Rasterzellen farbcodiert dargestellt (Bild A). Die rot gefärbten Bereiche besitzen negative ‘Differenztiefen’, d.h. das geglättete Grid liegt höher als das ungeglättete (Zunahme). Die blau dargestellten Rasterzellen sind durch eine Abnahme der Geländetiefe des geglätteten Grids gekennzeichnet (Abnahme). Deren Extremwerte sind in gelb dargestellt.

Unter Hinzunahme der Isoliniendarstellung zeigt sich, dass bei der Glättung des Geländemodells Kuppen abgeflacht und Talsohlen eingeebnet, also erhöht werden. Eindeutiger ist dieser Effekt bei dem Vergleich der Tiefenprofile in Bild B der Abbildung 3.12 nach zu vollziehen. Zwar ist der Verlauf des geglätteten Tiefenprofils in sich homogener, doch kann so die Oberflächenbeschaffenheit des Meeresbodens auch verfälscht wiedergegeben werden.

Die Glättung hat außerdem Einfluss auf den Neigungsparameter des Gittermodells (Bild C). Es wird insbesondere deutlich, dass steile Bereiche mit Neigungswinkeln größer 25° Grad stark abnehmen, oder sogar gänzlich verschwinden. Diese Tendenz ist auch in dem Vergleich der beiden Histogrammdarstellungen bezüglich der Hangneigung für die beiden Rastermodelle in Abbildung 3.10 zu erkennen. Es lässt sich feststellen, dass sich eine zusätzliche Glättung von Geländemodellen insbesondere in Veränderungen der Neigungsverteilung niederschlägt, was gerade hinsichtlich Untersuchungen möglicher submariner Hangrutschungen problematisch ist.

3.3.4 Genauigkeitsbetrachtung

Für die qualitative Einschätzung des berechneten Geländemodells ist ein Vergleich mit den gemessenen Wassertiefen mittels der Berechnung der Residuen v , den Abständen zwischen eingebrachten und modellierten Tiefen eines Punktes, sinnvoll. Für das Messgebiet wurde der Bereich für die Genauigkeitsbetrachtungen herangezogen, in dem auch die beiden starken seismologischen Ereignisse (siehe Abschnitt 1.2) registriert worden sind.

Für die Ableitung der Residuen ist es notwendig, jedem Messpunkt eine Tiefe des DGM zuzuordnen. Mit dem ArcInfo Befehl *latticespot* können vorgegebenen Positionen Tiefen eines Geländemodells mittels eines bilinearen Interpolationsansatzes zugeordnet

werden. Anschließend werden die Differenzen der in die Gridberechnung eingebrachten Tiefenwerte und den interpolierten Tiefen aus dem Geländemodell gebildet.

Um eine aussagefähige Einschätzung der Qualität des DGMs zu ermöglichen, werden für die anschließende Vorgehensweise die Rasterstrukturen erhalten und mit Hilfe der Befehlspalette *pointstats* die statistischen Berechnungen in ArcInfo für jede Rasterzelle durchgeführt. Die empirische Standardabweichung σ ergibt sich nach der Gleichung 3.2 aus der Quadratsumme der Residuen $[vv]$ und der Anzahl der Stichproben n einer Gridzelle.

$$\sigma = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}} \quad (3.2)$$

Aufgrund der tiefenabhängigen Messgenauigkeit des Fächersonarsystems erscheint die Angabe der empirischen Standardabweichung in Prozent der Wassertiefe d nach Gleichung 3.3 für die Einschätzung der Modellierung des Geländemodells als am besten geeignet, da sich so die Ergebnisse leichter mit den Herstellerangaben für die Tiefengenauigkeit des Hydrosweep-Fächerlotes in Beziehung stellen lassen.

$$\sigma_{[\%]} = \frac{\sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}}{d} \cdot 100 \quad (3.3)$$

In Abbildung 3.13 sind die auf die Wassertiefe normierten empirischen Standardabweichungen der einzelnen Rasterzellen unter Angabe der Häufigkeit im Testgebiet aufgetragen. Die mittlere Standardabweichung für diesen Bereich des Geländemodells, welcher über die *describe* Funktion für die Anzeige der Detailinformationen eines Grids in ArcInfo abgerufen werden kann, beträgt 0.5 ± 0.4 % der Wassertiefe. Damit repräsentiert das ungeglättete DGM die Messergebnisse des Hydrosweep Fächersonars innerhalb dessen durch Atlas Hydrographic angegebenen Bereich der tiefenbezogenen Messgenauigkeit von 1 % der Wassertiefe.

Wird die Verteilung der prozentualen Standardabweichungen zusammen mit den Isolinienverläufen flächenhaft dargestellt, ist deutlich deren Abhängigkeit von der Geländestruktur zu erkennen (siehe Abbildung 3.14). Je stärker die Meeresbodenoberfläche strukturiert und/oder geneigt ist, um so schlechter kann das gerasterte Geländemodell diese Details abbilden und um so höher fallen die Standardabweichungen der Rasterzelle aus (dunkelrot eingefärbte Bereiche). Für den überwiegenden Teil des Testgebietes ist aber festzustellen, dass es die Geländeformen des Meeresboden im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeiten repräsentativ abbilden kann.

Auch das geglättete DGM, für welches aufgrund der stärkeren Generalisierung von kleinräumigen Strukturen schlechtere Ergebnisse zu erwarten waren, weist nur unwesentlich höhere Werte für die Standardabweichung auf, die trotzdem noch im Rahmen der Messgenauigkeit der Fächersonars liegen.

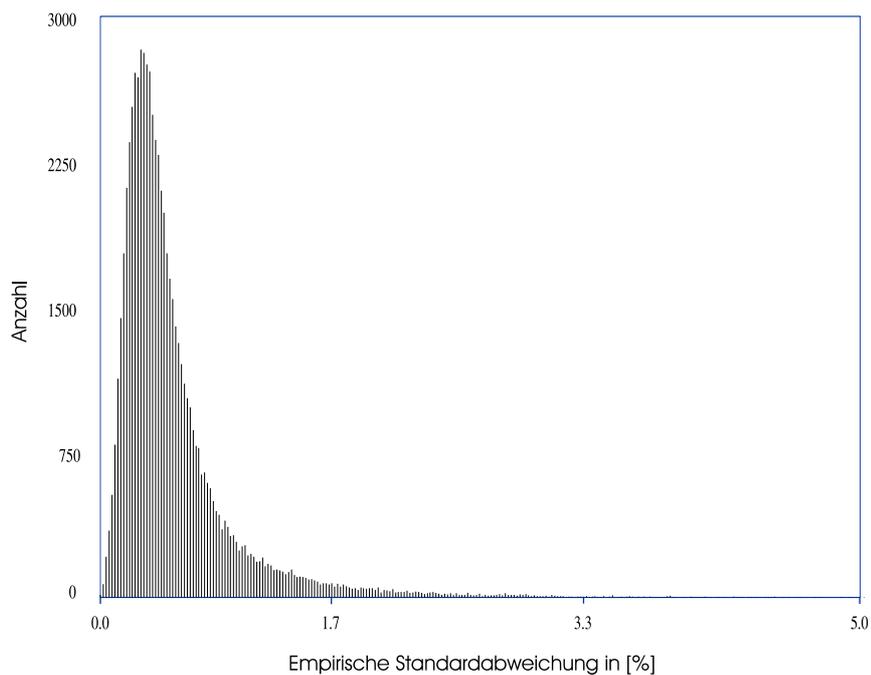


Abbildung 3.13: Verteilung der empirischen Standardabweichung in Prozent der Wassertiefe pro Rasterzellen im Testgebiet

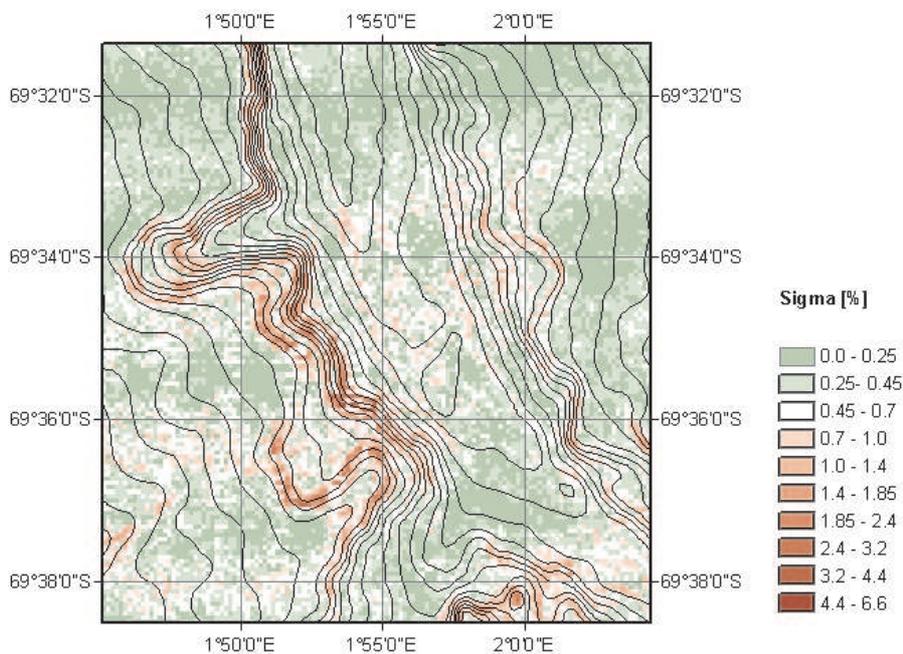


Abbildung 3.14: Farbcodierte Darstellung der empirischen Standardabweichungen in Prozent der Wassertiefe mit 50 m Isolinien

3.3.5 Erstellung der bathymetrischen Karte

Zur Visualisierung der Geländegestalt des Meeresbodens eignet sich die Darstellung der Isolinienverläufe in Form einer bathymetrischen Karte. Mit Hilfe des ArcInfo-Befehls *latticecontour* lassen sich Isolinien aus einem vorhandenen Geländemodell ableiten. Als Äquidistanz ist 50 m gewählt worden, um einerseits auch kleine Strukturen mit geringen Höhenvariationen darzustellen und andererseits trotz der steilen Hänge im Untersuchungsgebiet mit dicht aneinanderliegenden Isolinien die Übersichtlichkeit wahren zu können.

Aufgrund der zuvor durchgeführten Glättung des DGMs beschränkte sich die manuelle Nachbearbeitung der Isolinien auf die Randgebiete des Arbeitsgebietes, da hier aufgrund der geringeren Dichte und Qualität der Eingangsdaten bei der Berechnung des Rastermodells vereinzelt nur inhomogene Oberflächenformen modelliert werden konnten. Desweiteren wurden auch bei den in Abschnitt 3.3.3 beschriebenen Einzelprofilen die stark verkürzten Isolinien anhand deren ursprünglich abgeleiteten Verlaufes aus dem Ausgangsgitter wieder hergestellt.

Um den Gesamteindruck der Karte zu verbessern, können Lücken in der Isoliniendarstellung, die auf nicht vermessene Bereiche des Untersuchungsgebietes zurückzuführen sind, durch visuelle Interpolation unter Berücksichtigung der morphologischen Strukturen manuell geschlossen werden. Abbildung 3.15 zeigt drei dieser so bearbeiteten Bereiche. Insbesondere in Bild A weisen die manuell nachbearbeiteten Isolinien (blau) markante Abweichungen zu denen des als Vorlage dienenden ungeglätteten Geländemodells auf. Zur Orientierung dienten die benachbarten Tiefenlinien, an deren Verlauf die neu hinzu interpolierten Isolinien adaptiert wurden.

ArcInfo hält für die Kartenherstellung das Modul Arcplot bereit. Durch das Anlegen von AML²²-Skripten können die einzelnen Kommandozeilen, die für die Erstellung der bathymetrischen Karte notwendig sind, zusammengestellt werden, um diese umgehend neu abzurufen oder ggf. Modifikationen zeitnah durchzuführen. Das Ergebnis eines solchen Skriptes wird als PostScript-Datei abgespeichert, welche direkt von einem graphischen Ausgabegerät gelesen werden kann.

Die bathymetrische Karte, welche im Massstab 1 : 250 000 erstellt wird, beinhaltet neben der Darstellung der 50 m Isolinien der hochauflösenden Fächersonarmessung als Hintergrundinformation auch Daten des aktuellen 1 Minuten Grids der General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) aus dem Jahre 2003, deren Isolinienverläufe in ArcInfo eingelesen werden können. Sie sollen dem Betrachter der Karte einen besseren Gesamteindruck der umliegenden Topographie vermitteln, was leider aufgrund der inhomogenen Verfügbarkeit der globalen Isolinien im Bereich des Untersuchungsgebietes nur mit Abstrichen gelingt.

²²AML (Arc Macro Language) ist die von ArcInfo bereitgestellte Skriptsprache, in der die plattformunabhängige Programmierung von ArcInfo-Applikationen ermöglicht wird.

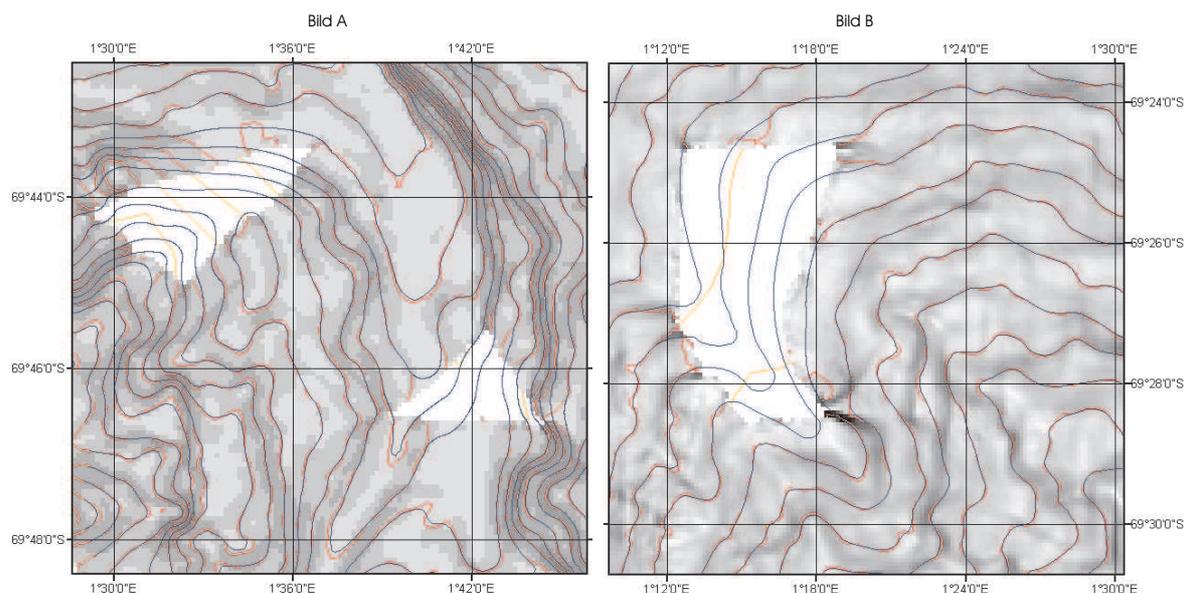


Abbildung 3.15: Beispiele der nach morphologischen Gesichtspunkten hinzu interpolierten Isolinien (blau). Hinterlegt sind die Isolinien aus GEBCO (orange) sowie die Isolinien (rot) und das Neigungsgrid des ungeglätteten DGM.

Für die bessere Hervorhebung der Tiefenbereiche werden die Isoliniendarstellungen mit Tiefenstufenpolygonen unterlegt. Die in 500 m Intervallen farblich abgestuften Polygone wurden aus dem Umring des ungeglätteten Geländemodells unter Hinzunahme der entsprechenden Isolinien abgeleitet. Nachdem die Tiefenpolygone mit Attributen für die jeweilige Tiefenstufe versehen wurden, konnten ihnen die entsprechenden Flächenfarben zugewiesen werden. Die nicht vermessenen Bereiche, die unter morphologischen Gesichtspunkten abgeleitete Isolinien besitzen, werden mit einer gesonderten Farbe hinterlegt, um sie von den aus dem DGM rechnerisch abgeleiteten Tiefenlinien klar unterscheiden zu können.

Desweiteren ist auch der Küstenlinienverlauf der Antarktis des Scientific Committee of Antarctic Research (SCAR), Stand 2000, in die Darstellung der bathymetrischen Daten übernommen worden.

Als Vorlage für die graphische Gestaltung der Karte ist die AWI 'Bathymetric Chart of the Fram Strait', die am Alfred-Wegener-Institut erstellt wurde (Klenke, 2002), herangezogen worden.

3.4 Dreidimensionale Visualisierung des DGMs

Die dreidimensionale Darstellung digitaler Geländemodelle bietet neben einer guten Präsentationswirkung auch wertvolle Möglichkeiten für die Analyse topographischer Strukturen, da durch die räumliche Betrachtungsweise auch kompliziertere morphologische Details gut erfassbar sind.

Am AWI wird das Programm *Fledermaus* von Interactive Visualisation Systems Inc. (IVS) für die dreidimensionale Visualisierung von Geländemodellen genutzt. Es bietet die Möglichkeit, das Modell interaktiv aus verschiedenen Blickwinkeln zu betrachten, sich darin zu bewegen oder 3D-Ansichten in Form von einzelnen Bildern, Bilderserien und in Weiterverarbeitung dieser schließlich auch als Film aus dem Programm zu extrahieren.

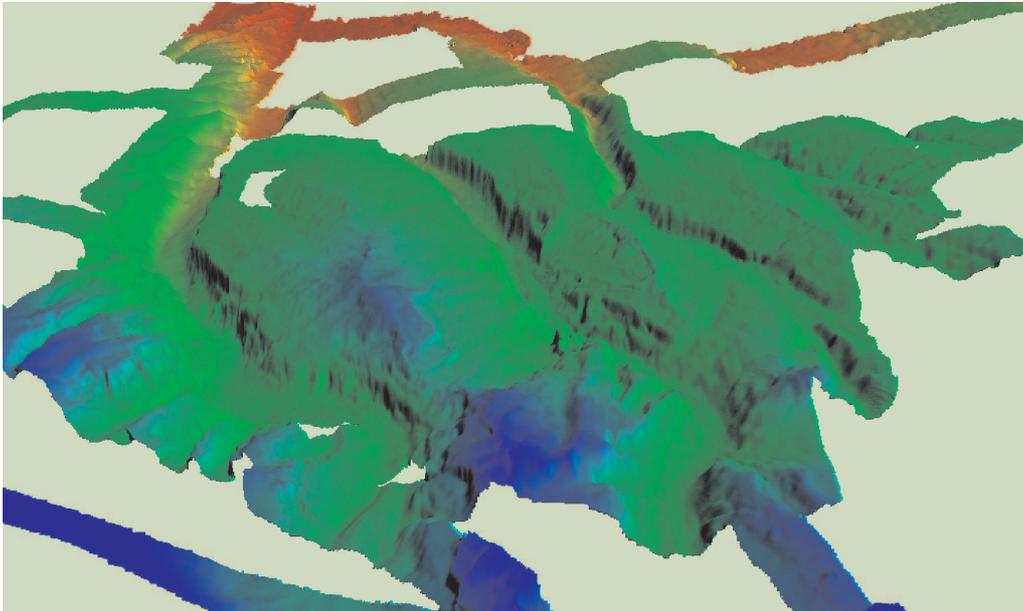


Abbildung 3.16: Übersichtsdarstellung des ungeglätteten DGM in *Fledermaus*.

Für den Import eines Geländemodells in das *Fledermaus*-eigene *sd*-Format kann durch das Einlesen einer mit dem ArcInfo Befehl *Gridascii* erstellten Datei bewerkstelligt werden. In dieser ASCII Datei, in deren Header Informationen über Zellgröße sowie Anzahl der Zeilen und Spalten hinterlegt sind, werden die Tiefenwerte der einzelnen Rasterzellen des Geländemodells abgelegt. Dabei wird den Zellen ohne Tiefeninformation eine nicht im Datenbereich vorkommene Zahl als Statthalter eingetragen, anhand derer diese beim Import in das Visualisierungsprogramm herausgefiltert werden können.

In Abbildung 3.16 ist das Untersuchungsgebiet im Gesamtüberblick dargestellt. Es wird das ungeglättete DGM in *Fledermaus* in nordöstlicher Blickrichtung gezeigt. Neben

den eindeutig zu erkennenden Gräben zeichnen sich auch im Bereich der Levees²³ feine Strukturen ab, die nicht auf mögliches Messräuschen der Fächersonardaten zurück zu führen sind. Um diese Strukturen in dieser Deutlichkeit erkennen zu können, sind entsprechende Einstellungen hinsichtlich der Beleuchtung des Grids notwendig. Bei der Bewertung der dargestellten Geländeformen ist zu berücksichtigen, dass verschiedene Beleuchtungsrichtungen auch unterschiedliche Eindrücke der Geländegestalt bewirken, so dass es auch leicht zu Fehlinterpretationen kommen kann.

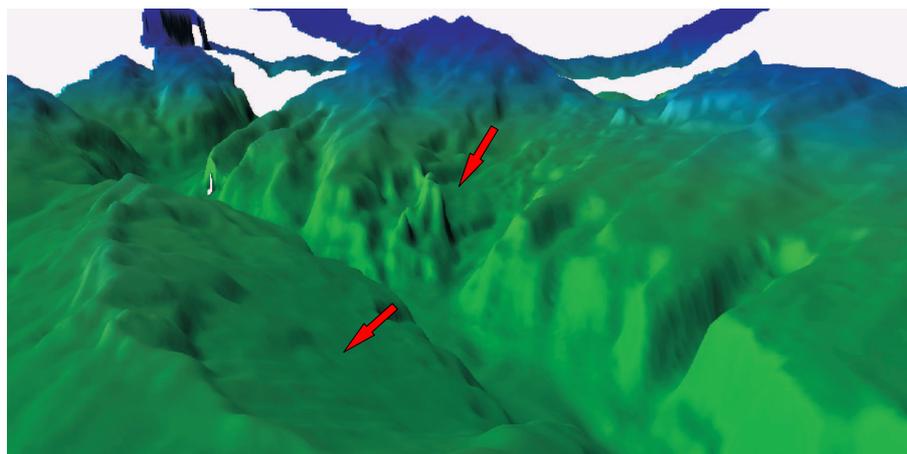


Abbildung 3.17: 3D-Ansicht der beiden Bereiche des Untersuchungsgebietes, auf welche die starken seismologischen Signale zurückgeführt wurden.

Die Detailansicht in Abbildung 3.17 zeigt die Stellen, an denen die beiden Epizentren vermutet worden sind. Sie stellt das ungeglättete DGM in südwestlicher Blickrichtung dar. Es sind an beiden Stellen des Messgebietes Anzeichen submariner Rutschungen zu erkennen, deren Auftreten aber auch in den anderen Teilen des Untersuchungsgebietes aufgrund der morphologischen Gestalt des Meeresbodens zu vermuten sind.

Für die Einschätzung der zusätzlichen Glättung des Gittermodells (siehe Abschnitt 3.3.3) sind in Abbildung 3.18 die beiden DGMs gegenübergestellt. Beide zeigen den gleichen Ausschnitt des Geländemodells unter den selben Beleuchtungsparametern. Die in dem ungeglätteten DGM (Bild A) gut zu erkennenden Anzeichen einer submarinen Rutschung werden beim geglätteten Geländemodell (Bild B) nur noch in stark generalisierter Form dargestellt.

Obwohl in Bild A auch die gesamte Oberfläche unruhiger ist, bildet das ungeglättete Modell die Oberflächenformen des Meeresbodens realitätsgetreuer ab. Daher wird für die folgenden Arbeitsschritte nur noch auf das ungeglättete Geländemodell zurückgegriffen. Die auf das größere Messräuschen der Außenbeamtiefen zurückzuführenden

²³Levees entstehen an Rändern von submarinen Canyons, denen durch Strömung (wie z.B. bei Bildung thermo-salinen Tiefenwasser) mehr Sediment eingetragen wird, als dieser aufnehmen kann

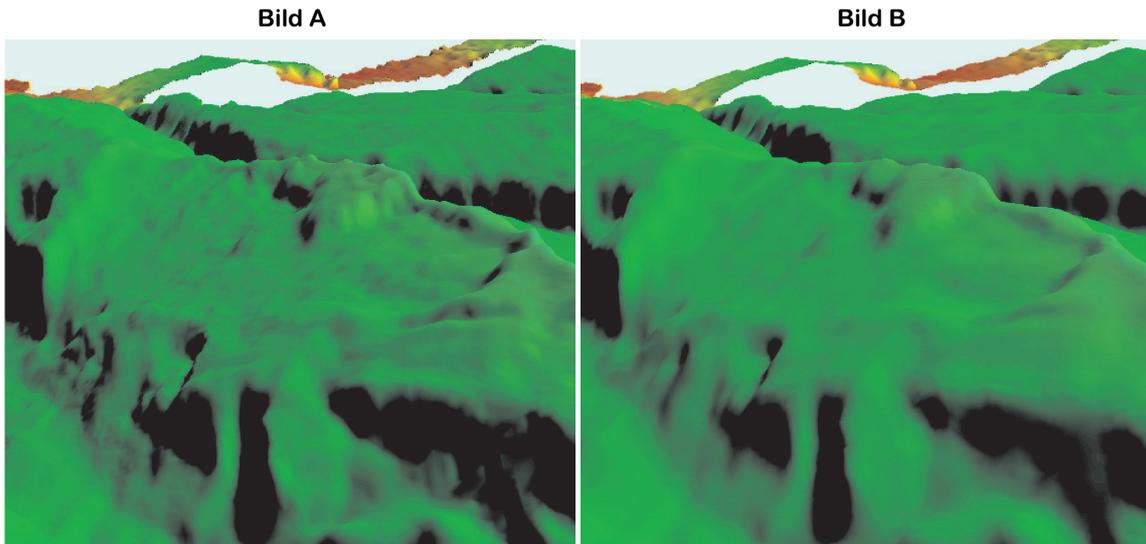


Abbildung 3.18: Vergleich zwischen 3D-Darstellungen des unglätteten (Bild A) und geglätteten (Bild B) DGMs im Bereich des weiter nördlich gelegenen, angenommenen Epizentrums.

Artefakte in den Randbereichen des DGMs müssen dabei in Kauf genommen werden.

Mit Hilfe der frei verfügbaren *iView3D*-Software von IVS können die in programm-eigenen Formaten vorliegende Modelle auch außerhalb der *Fledermaus*-Umgebung interaktiv betrachtet oder auf vorhandenen Wegprofilen durchflogen werden. Neben der reinen dreidimensionalen Darstellung von Datenmodellen bietet *Fledermaus* auch Funktionen für deren Analyse wie beispielsweise der Erstellung von Histogrammen oder Profilansichten bis hin zum Editieren von Tiefenpunkten aus Fächersonarmessungen. Desweiteren besitzt das Programm auch Möglichkeiten des Einbindens von digitalen Bildformaten und der Implementierung von seismischen Messungen, die dem Standard des SEG-Y²⁴-Formates entsprechen.

²⁴SEG-Y ist das am weitesten verbreitete Datenformat unter den international anerkannten SEG-Formaten (Society of Exploration Geophysicists) im Bereich der Reflexionsseismik. Die einzelnen Datenwerte werden in demultiplexter Form, d. h. die Zuordnung erfolgt nach dem Registrierkanal und nicht nach der Zeit (multiplext), vorgehalten.

4 Prozessierung der Parasound-Seismogramme

4.1 Das PS3-Format

Die mit dem Datenakquisitionsprogramm ParaDigMA aufgezeichneten Parasound Seismogramme werden in dem binären PS3-Format vorgehalten. Dieses Format vermerkt für jede einzelne Seismogrammspur in einem vorangestellten Header wichtige Informationen über die Messeinstellungen des Parasoundsystems, sowie die für die weitere Prozessierung wichtige Positionierung und weiteren Zusatzinformationen, wie beispielsweise die Geschwindigkeit und den Kurs über Grund. Diese systemexternen Parameter werden alle 5 Sekunden über eine serielle Schnittstelle des Parasound-Datenerfassungsrechners durch ein Datentelegramm aus PODAS übermittelt.

Das PS3-Format wurde in Anlehnung an das in der Reflexionsseismik gebräuchliche SEGY-Format eigens für die Aufzeichnung der digitalen Seismogramme des Parasound-Sedimentecholotes entwickelt.

Die einzelnen Seismogrammspuren innerhalb einer Datei werden mit dem vorangestellten Spurheader sowie einer aufsteigenden fixierten Rekordzahl versehen und in chronologischer Reihenfolge nacheinander weggeschrieben. Beim Wegschreiben der Headerinformationen gibt es zwischen SEGY und PS3 unterschiedliche Formatkonventionen mit denen die Headerinformationen versehen werden. Während bei SEGY alle Informationen als *Integer4* Variablen (4 Byte) vorgehalten werden, sind bei dem PS3-Format aus Gründen der effektiveren Ausnutzung des Speicherplatzes Parametern mit geringerer Auflösung durch eine *Integer2* Variable (2 Byte) ersetzt worden.

Das Datenformat für die einzelnen Signalspuren wird von dem Voltmeter bestimmt, welches das einlaufende seismische Signal digitalisiert. Das Gerät verfügt über 4 Messbereiche 10.24 V, 2.56 V, 0.32 V und 0.04 V, aus denen über ein sogenanntes ‘Autorangeverfahren’ die für einen Datenwert optimale Einstellung ermittelt wird. Bei einer maximalen Abtastrate für einen Kanal von maximal 100 kHz beträgt die Auflösung 13 Bit. Ein Bit in dem Datenstring wird für das Vorzeichen vorgehalten und zwei weitere für den Exponenten, so dass mit einem 16 bit²⁵-Datenformat ein Dynamikbereich von 120 dB abgedeckt werden kann und damit die Amplitudenschwankungen von Parasound-Seismogrammen umfasst(Spieß, 1993).

²⁵16 bit entsprechen 2 Byte.

Dieses bei der Datenerfassung generierte Format wird beim Transfer an die Speicher-einheit sowie dem Wegschreiben der Daten beibehalten und nur für die graphische Darstellung auf dem Bildschirm (siehe Abschnitt 2.6) dekodiert.

4.2 Datengrundlage

Die Speicherung der digitalen Parasound-Seismogramme in eine PS3 Datei kann durch den Anwender über das Setzen einer maximalen Dateigröße oder/und einer maximalen Zeitdauer der Aufnahme limitiert werden. Dies soll den Datenausfall für den Fall nicht-lesbarer Dateien minimieren. Die dieser Arbeit vorliegenden PS3 Dateien sind auf eine Größe von 3.89 MB und eine zeitliche Aufnahmedauer von zehn Minuten eingeschränkt worden.

Die Nichtlesbarkeit von Dateien beruht meist in fehlerhaften Headereinträgen, die das Auswerteprogramm nicht entschlüsseln bzw. einordnen kann und daraufhin die weitere Verarbeitung der Datei abbricht.

Im Vorfeld konnten die Headereinträge der PS3 Dateien mit Hilfe eines Programmes von 'FIELAX, Gesellschaft für wissenschaftliche Datenverarbeitung mbH' auf inkorrekte Einträge des Datums und der Uhrzeit sowie auf Unregelmäßigkeiten der einge-tragenen Positionierung überprüft werden. Dabei wurden bei den Headereinträgen der rund 115000 Seismogrammspuren, welche in den 724 PS3 Dateien vom 23. bis 27. De-zember 2001 aufgezeichnet worden sind, insgesamt 64 falsche Zeitstempel und 2865 inkorrekte Positionseintragungen detektiert. Diese Ergebnisse sind hinsichtlich der re-lativen Häufigkeit der jeweiligen Fehleinträge als durchaus repräsentativ für die Daten der Parasoundmessungen anzusehen.

Die Spuren mit korrupten Datum/Zeiteinträgen werden herausgelöscht, da für die Auf-nahmen der Sedimentechogramme, ebenso wie bei der Prozessierung der Fächersonar-daten, die Zeit als unveränderbare Größe angesehen wird, über die alle weiteren In-formationen zugeordnet werden und diese somit nicht ausgetauscht werden kann. Die Rekordnummern der nachfolgenden Seismogrammspuren einer PS3 Datei wurden in Rahmen des Herauslöschens der fehlerbehafteten Daten aufdatiert.

Die Header der inkorrekten Positionseinträge wurden ebenso wie eine Liste aller ver-bleibenden Seismogrammspuren in eine separate Textdatei geschrieben.

Für die weitere Bearbeitung der Daten im PS3 Format erweisen sich die Eintragun-gen des Parasound-Wachbuches als sehr hilfreich, in welchem während der Messung die Einstellungen des Systems, positionsrelevante Parameter sowie evtl. zusätzliche Be-merkungen zum Systemstatus in 15 Minuten Intervallen vermerkt werden. Des weiteren enthalten sie Skizzen der detektierten Sedimentstrukturen und erleichtern somit die Su-che nach interessanten Abschnitten für die weitere Auswertung. Für einen detaillierteren Einblick können die Farbausdrucke der schon an Bord erstellten Seismogrammplots ge-nutzt werden.

Die Parasound Messungen wurden im Pilottonmodus (siehe Abschnitt 2.6) mit einer tiefenabhängigen Einstellung des Rangebereiches von meist 5000 m durchgeführt. Die durchschnittliche Profilgeschwindigkeit beträgt während der systematischen Vermessung 9 bis 10 kn und bei den reflexionseismischen Messungen durchschnittlich 5 bis 6 kn. Die Registrierdauer ist auf 200 m eingestellt und wird von dem Operator durch das Versetzen des Tiefenfensters in 50 m Schritten der aktuellen Wassertiefe angepasst. Die seismischen Aufnahmen wurden mit einer Frequenz von 40 kHz über das schon besprochene Voltmeter digitalisiert.

4.3 Die SeNT Software

Für weitere Untersuchungen der im PS3-Format vorliegenden digitalen Parasounddaten können diese mit dem am AWI genutzten Programm SeNT²⁶ bearbeitet werden. Neben der graphischen Darstellung der einzelnen Seismogrammspuren, die in chronologischer Reihenfolge aufeinander folgend über den Headereintrag des Tiefenfensters in den richtigen Tiefenbezug zueinander gebracht werden, hält es noch weitere Möglichkeiten der interaktiven Bearbeitung vor, die hier aufgrund einer nicht vorhandenen Dokumentation der einzelnen Funktionalitäten des Programmes nur in groben Zügen dargestellt werden können.

Dabei ist es wichtig, schon im Vorfeld darauf hinzuweisen, dass nur eine nachhaltige Änderung der einzelnen, den Spuren vorangestellten Headereinträge möglich ist, aber die angewendeten Filtereinstellungen der seismischen Spuren nicht in den PS3-Dateien niedergeschrieben werden können. Das ist für das Abspeichern von Zeitsequenzen in dem stärker komprimierten PSI²⁷-Format möglich, welches ebenfalls mit SeNT dargestellt werden kann.

Eine nachhaltige Sicherung des dargestellten Seismogramms kann nur in Form von digitalen Bilddateien erfolgen. Dies ist entweder durch den im SeNT-Programm implementierten Export in ein Bitmap-Format oder durch einen Screenshot möglich.

Die Auswahl eines Profilabschnittes der Parasound-Seismogramme zur graphischen Darstellung mit SeNT erfolgt über die Eingabe einer Start- und Endzeit. Über die Festlegung dieser Zeiten können für die weitere Bearbeitung hinsichtlich einer georeferenzierten Darstellungsmöglichkeit der Parasound-Seismogramme auch die Positionen des Anfangs- und Endpunktes aus den Navigationsdaten der Headereinträge hergeleitet werden.

Für das Abspielen der einzelnen aufeinanderfolgenden Seismogrammspuren gibt es drei verschiedene Darstellungsmöglichkeiten (siehe Abbildung 4.1). Es können Seismogramme mit korrekter Abbildung der Positionen (Bild A), also streckentreu dargestellt

²⁶SeNT ist ein an der Universität Bremen (Marine Technologie/Umweltforschung - MTU) von Dr. Hanno von Lom entwickeltes Programm, mit dem PS3-Dateien bearbeitet und als Seismogramme auf dem Bildschirm graphisch ausgegeben werden können.

²⁷PSI steht für Parasound Image.

werden. Ebenso sind auch Darstellungen mit einer Skalierung auf der Zeitachse (Bild B) möglich. Des Weiteren kann jeder Spur auch eine bestimmte Pixelbreite (*Pixel pro Spur*) für die Darstellung auf dem Bildschirm zugewiesen werden (Bild C).

Über diesen Darstellungen ist in Abbildung 4.1 der Verlauf der Geschwindigkeit aufgetragen, der sich auf den streckentreu geplotteten Seismogrammschrieb in Bild A bezieht. Es ist zur Veranschaulichung extra ein Profilstück mit starken Geschwindigkeitsvariationen ausgewählt worden, um die Problematik der Wahl der Darstellungsart aufzuzeigen.

Unter dem Gesichtspunkt der homogeneren Bildkomposition ist die Darstellung nach *Pixel pro Spur* für Interpretationszwecke am Besten geeignet und den anderen beiden deutlich vorzuziehen, da diese jede Seismogrammspur in gleicher Breite darstellt und es aufgrund des inhomogenen Schussabstandes des Pilottonmodus nicht zu den Verzerrungen des letzten Signals einer Triggerperiode kommt, wie bei der Zuordnung nach der Zeit oder der Positionierung, deren Werte jeweils aus den Headereinträgen der Seismogrammspuren entnommen werden.

Das Bild der streckentreuen Seismogrammdarstellung ist noch gröber aufgelöst, da zu den zuvor beschriebenen Verzerrungseffekten auch noch die sprunghafte Aktualisierung der Position hinzukommt, die in dem nur alle 5 Sekunden übertragenen Telegramm aus PODAS begründet ist.

Daraus folgt auch, dass die kurz hintereinander folgenden Signalspuren einer Triggerperiode meist mit der gleichen Position versehen werden und daraufhin übereinander dargestellt werden. Dies bedeutet gleichzeitig einen Informationsverlust, da so – abhängig von der Anzahl der Pulse einer Triggerperiode und dem Einlaufen des Navigationstelegrammes aus PODAS – beispielsweise nur jede dritte Spur in SeNT aufgrund der redundanten Positionierung dargestellt werden kann. Die letzte Spur einer Triggerperiode unterliegt dabei ähnliche Verzerrungen wie bei der Darstellung nach der Zeit.

Nachteil der mit *Pixel pro Spur* oder nach der Zeit dargestellten Parasound-Seismogramme ist die falsche Wiedergabe der Geländeoberfläche. Wie in Abbildung 4.1 beispielhaft aufgezeigt wird, kommt es bei nicht konstanten Fahrtgeschwindigkeiten des Schiffes zu Dehnungen bzw. Stauchungen der abgebildeten Meeresbodenoberfläche. In diesem Beispiel wurde die Fahrt des Schiffes von ca. 9 kn innerhalb von zehn Minuten auf 1 kn gestoppt, um dann wieder mit der gleichen Ausgangsgeschwindigkeit weiter zu fahren. An der horizontalen Achse der Seismogrammausschnitte sind unterhalb die zurückgelegte Strecke und oberhalb die Marken der Uhrzeit gesetzt. Über diese Angaben können die Relationen zwischen den verschiedenen Darstellungsmöglichkeiten in SeNT hergestellt werden. An der vertikalen Achse sind die Tiefen, bezogen auf 1500 m/s, aufgetragen.

Als georeferenzierte Darstellung der Parasound-Seismogramme mit dem Ziel einer realitätsgetreue Abbildung des Meeresbodenreliefs sind deshalb nur die nach der Strecke ausgegebene Parasound-Profile geeignet. Daher muss für diese Zwecke die schlechte Bildqualität vorerst in Kauf genommen werden. Eine Verbesserung hinsichtlich der

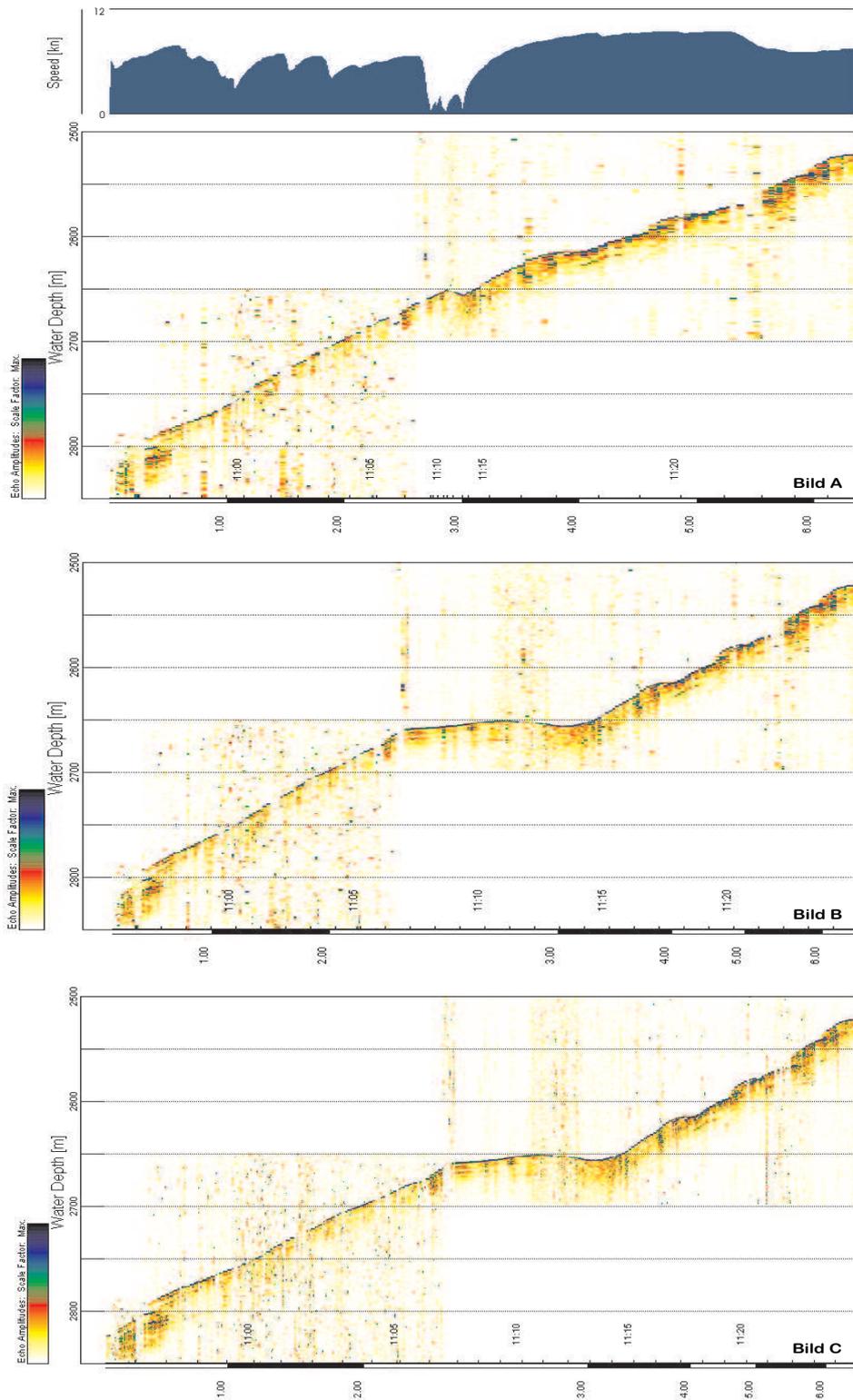


Abbildung 4.1: Darstellung der drei verschiedenen Plotmöglichkeiten von Parascismogrammen in SeNT. Bild A: streckentreu ; Bild B: nach der Zeit; Bild C: *Pixel pro Spur*

Auflösung ergibt sich durch eine Verringerung der Schiffsgeschwindigkeit während der Messungen, wie es auch in der Abbildung 4.1 gut zu erkennen ist.

4.4 Navigationsbereinigung

Die im Abschnitt 4.2 beschriebenen ca. 3000 fehlerhaften Navigationseinträge in den Seismogrammheadern müssen für eine streckentreue Darstellung der Parasound-Seismogramme korrigiert werden.

Ursächlich ist die vergleichsweise hohe Fehlerquote nicht in der GPS-Positionierung begründet, sondern ergibt sich vermutlich aus der technischen Hardware-Software-Konfiguration des Parasoundanlage.

So ergeben sich für die Navigationsdaten des Parasound neben den eventuell vorhandenen Sprüngen der originären Positionierung des ausgewählten Sensors auch Fehler bei den Vorzeichen, fehlerhaften Werten für die Koordinaten, sowie völlig falschen Angaben der Position der Seismogrammspur wie beispielsweise geographische Koordinatenangaben des Breitengrades von 94° .

SeNT bietet für die Korrektur der Navigation ein Interpolationsmodul an, dessen Anzeige in Abbildung 4.2 dargestellt ist. Es besteht die Möglichkeit, Positionsdaten nach unveränderlichen Positionen zu durchsuchen, was über das Setzen von Zeitintervallen bzw. Streckenintervallen in SeNT rechnerisch überprüft wird. Es können die Vorzeichen der Koordinaten festgelegt werden, sofern die Daten sich nicht über zwei Quadranten erstrecken. Desweiteren können Positionseinträge von 0° N und 0° E durch Interpolation korrigiert werden.

Alle diese Funktionen wurden für die Daten des Untersuchungsgebietes angewendet. Sie können aber nicht grobe Positionssprünge aufdecken und diese beheben.

Zu diesem Zweck mussten die aus dem in Abschnitt 4.2 beschriebenen Überprüfungsprogramm der Headereinträge von FIELAX entstandenen Dateien mit Angaben der fehlerhaften Positionseinträge in einem Tabellenkalkulationsprogramm so aufbereitet werden, dass die inkorrekten Einträge mit Hilfe eines linearen Interpolationsansatzes über die Zeit berichtigt werden konnten. Die korrigierten Werte wurden anschließend mittels des *Header Edit*-Moduls in SeNT manuell eingebracht, was einerseits einen hohen Zeiteinsatz beanspruchte und wodurch zum anderen nur gröbere Navigationsaussetzer bereinigt werden konnten.

Das Problem der in kurzer Pulsfolge aufeinander liegenden Seismogrammspuren, denen die gleiche Position aus dem letzten PODAS Telegramm zugewiesen wird, konnte mittels der Interpolation stetiger Stellen in SeNT (wie oben beschrieben) homogenisiert werden. Die durch die Navigationstelegramme aus PODAS, welche nur alle 5 Sekunden an die Parasound Anlage übermittelt werden, verursachten Sprünge in der Positionszuweisung der Seismogrammspuren können an dieser Stelle aufgrund der im Binärformat vorlie-

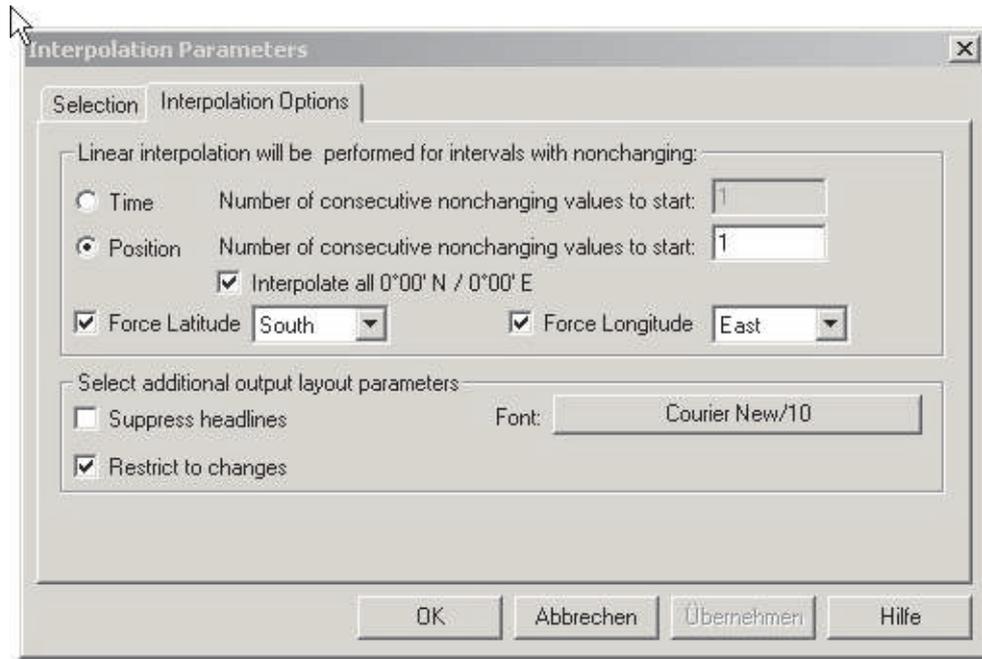


Abbildung 4.2: Interpolationsmöglichkeiten innerhalb der SeNT-Software.

genden Daten nicht behoben werden.

Bei der Einstellung des Rangebereiches von 5000 m ergaben sich für die Messungen in dem systematisch profilierten Bereich des Untersuchungsgebietes 2 bis 5 Pulse in einem Abstand von ca. 0.6 s bei einer Triggerfolgedauer von 8.31 s und Sendepausen von 5 bis 7 Sekunden. In Tabelle 4.1 sind Headerinformationen eines Profilausschnittes dargestellt. Die durchschnittliche Geschwindigkeit beträgt etwa 10.5 kn, also umgerechnet 5.4 m/s. Demnach sollte bei einer Pause von 7.15 s oder einen Pulsabstand von etwa 0.6 s Strecken von rund 38.5 m bzw. 3.3 m zurückgelegt werden. Diese theoretischen Werte bestätigen sich allerdings in den seltensten Fällen.

Vielmehr hängen die Strecken zwischen den einzelnen Schüssen von dem Zeitpunkt ab, an dem das Navigationstelegramm aktualisiert wird. So werden beispielsweise zwischen dem Rekord 129 und 130 laut Headereintrag innerhalb von 0.66 s knapp 30 m zurückgelegt. Dies ergibt sich, weil in der Zwischenzeit ein neues Navigationstelegramm eingegangen ist. Es kann abschließend gesagt werden, dass somit die Positionierung der einzelnen Spuren etwas willkürlich ist, obwohl dies angesichts eines Footprints von 180 m (7% der Wassertiefe) und entsprechender Überlappungsbereiche evtl. noch vertretbar wäre. Doch gerade in morphologisch sehr stark strukturierten Messgebieten, bei der ein streckentreues Abspielen der Seismogrammspuren für georeferenzierte Darstellungen, die sich dem Meeresbodenoberfläche möglichst gut anpassen sollen, unablässig ist, könnte eine korrekte Navigation zu einer besseren Auflösung der Seismogramme beitragen.

Tabelle 4.1: Ausschnitt ausgewählter Headereinträge aus den navigationsbereinigten Parasound-Daten

Rekordnummer	Datum	Uhrzeit	Zeitdifferenz	Länge	Breite	Strecke	Tiefe	Geschwindigkeit
			in [s]	in [°]	in [°]	in [m]	in [m]	in [kn]
Range 5000 m: Triggerperiode 8.31 s								
123	25.12.01	07:26:30.90	7.13	1.84050	-69.38392	48.25	2583.0	10.6
124	25.12.01	07:26:31.58	0.68	1.84036	-69.38392	5.44	2583.0	10.6
125	25.12.01	07:26:32.11	0.53	1.84028	-69.38392	3.26	2583.0	10.6
126	25.12.01	07:26:39.25	7.14	1.83911	-69.38397	46.09	2579.0	10.6
127	25.12.01	07:26:39.91	0.66	1.83906	-69.38397	2.18	2579.0	10.6
128	25.12.01	07:26:40.43	0.52	1.83900	-69.38397	2.18	2579.0	10.6
129	25.12.01	07:26:47.59	7.16	1.83844	-69.38397	21.75	2579.0	10.8
130	25.12.01	07:26:48.25	0.66	1.83769	-69.38403	30.01	2581.0	10.8
131	25.12.01	07:26:48.77	0.52	1.83764	-69.38403	2.18	2581.0	10.8
132	25.12.01	07:26:55.92	7.15	1.83694	-69.38403	27.19	2581.0	10.8
133	25.12.01	07:26:56.58	0.66	1.83683	-69.38403	4.35	2581.0	10.8
134	25.12.01	07:26:57.11	0.53	1.83672	-69.38403	4.35	2581.0	10.8
135	25.12.01	07:27:04.25	7.14	1.83556	-69.38403	45.68	2582.0	10.3
136	25.12.01	07:27:04.91	0.66	1.83550	-69.38403	2.18	2582.0	10.3
137	25.12.01	07:27:05.43	0.52	1.83544	-69.38403	2.18	2582.0	10.3
138	25.12.01	07:27:12.58	7.15	1.83494	-69.38403	19.58	2582.0	10.3
139	25.12.01	07:27:13.25	0.67	1.83481	-69.38403	5.44	2582.0	10.3
140	25.12.01	07:27:20.91	7.66	1.83350	-69.38403	51.12	2584.0	10.3
141	25.12.01	07:27:21.58	0.67	1.83339	-69.38403	4.35	2584.0	10.3
142	25.12.01	07:27:22.10	0.52	1.83331	-69.38403	3.26	2584.0	10.3
143	25.12.01	07:27:29.25	7.15	1.83225	-69.38403	41.33	2585.0	10.3
144	25.12.01	07:27:29.91	0.66	1.83219	-69.38403	2.18	2585.0	10.3
145	25.12.01	07:27:30.43	0.52	1.83214	-69.38403	2.18	2585.0	10.3

Eine nachhaltige Lösung des Navigationsproblems bietet FIELAX an, indem die originären Navigationsdaten mit denen des Hydrosweep Systems, welche in Form von Nak²⁸-Dateien in positionskorrigierter Form vorliegen, ersetzt werden. Dabei wird durch Interpolation über die Zeit jeder Seismogrammspur eine konkrete Position zugeordnet. Für in dieser Form prozessierte Parasounddaten ist hinsichtlich des Plottens nach der Strecke eine ebenso genaue Auflösung der Seismogrammdarstellung zu erwarten, wie es sonst mit dem Abspielen über der Zeit möglich ist, was schon eine deutliche Verbesserung darstellt.

²⁸Nak-Dateien beinhalten die Positionen und auf 1500 m/s normierten Tiefen des Centerbeam des Hydrosweep-Fächerlotes und werden am Ende der in der Bathymetriegruppe des AWI gebräuchlichen Bearbeitungskette von Fächersonardaten aus dem Hyd-Format gebildet. Sie sind in der Regel navigationskorrigiert und dienen der schnellen Darstellung von Trackplots für die Expeditionen von FS 'Polarstern'.

4.5 Filterung der Seismogrammdarstellungen

Neben einer korrekten Navigation trägt auch eine für die jeweiligen Daten angepasste Filterung zu einer aussagekräftigen Darstellung der Parasound-Seismogramme bei. In SeNT sind einige Filtermethoden enthalten, auf die im Folgenden kurz eingegangen werden soll.

Zum Testen der Filter wurde die Darstellung mit *Pixel pro Spur* gewählt, da so die Wirkung der jeweiligen Einstellungen am Besten beurteilt werden kann.

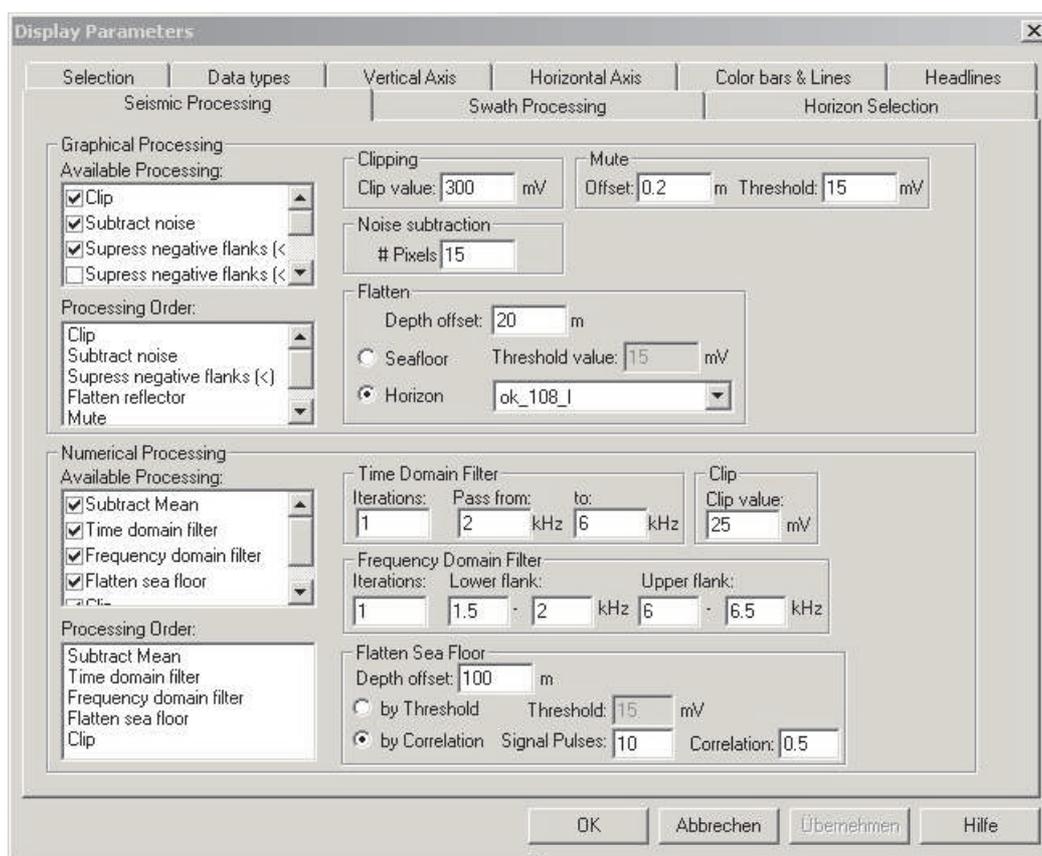


Abbildung 4.3: Dialogfeld für die seismische Filterung der Parasounddaten in SeNT

Eine erste Möglichkeit der modifizierten Abbildung der Seismogramme ist das Einschränken des für die Darstellung benutzten Amplitudenbereiches mit der *clip*-Funktion für den oberen und *mute* für den unteren Bereich der Amplitudenwerte. Dadurch ist es möglich, das von der angewendeten Farbpalette (*Colorpalette*) vorgehaltene Farbspektrum für einen bestimmten Amplitudenbereich zurückzuhalten, für den besonderes Interesse vorhanden ist. Die Amplitudenwerte, welche die eingegebenen Grenzwerte über- bzw. unterschreiten, werden mit einer Farbe dargestellt. Hilfreich für die Einstellung

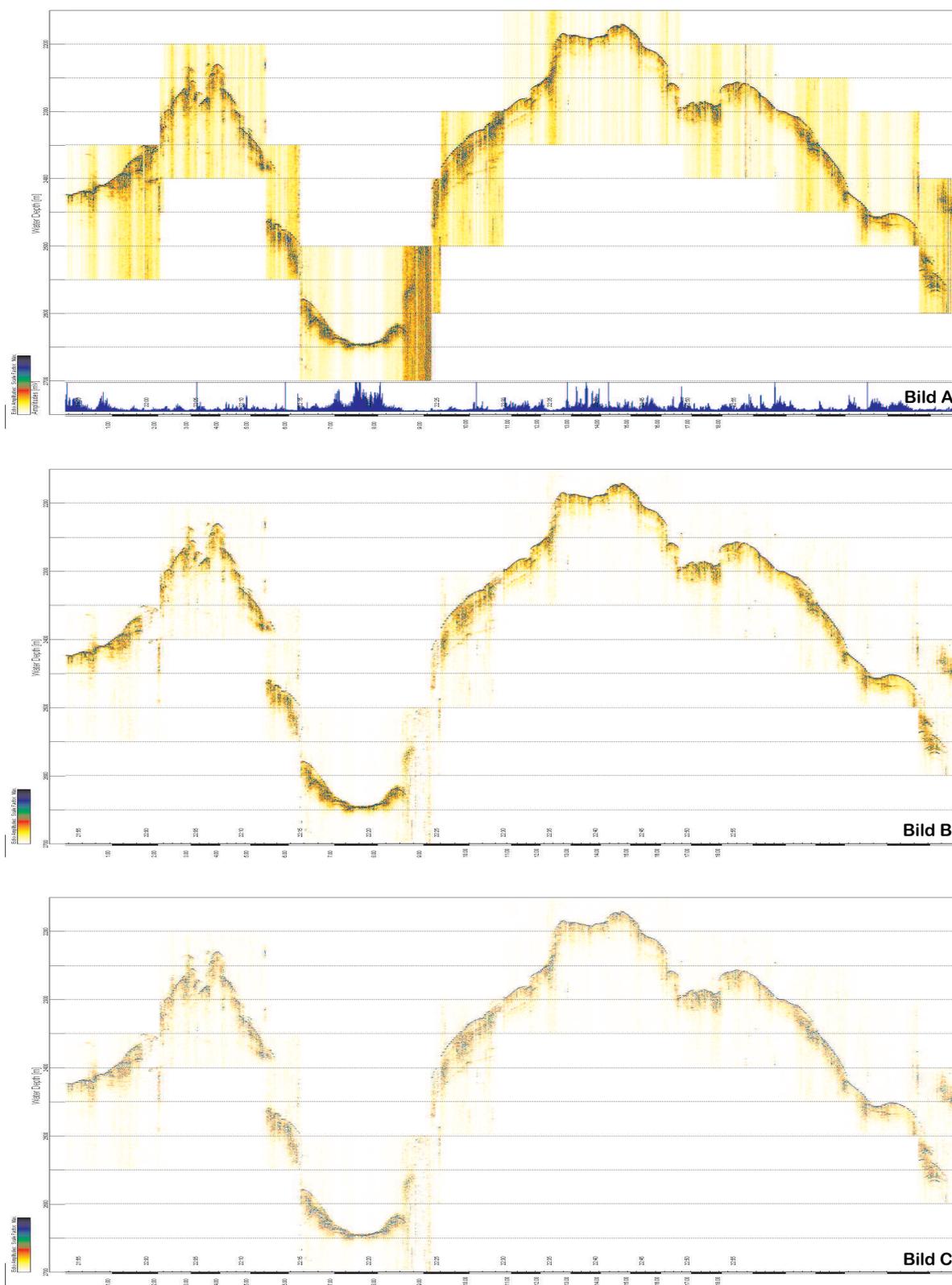


Abbildung 4.4: Bild A: ungefiltertes Seismogramm mit Anzeige der Amplitude (blau); Bild B: Filtereinstellung: *Subtract Noise* (15 Pixel), *Subtract Mean*; Bild C: Filtereinstellung: *Subtract Noise* (15 Pixel), *Suppress Negative Flanks*, *Subtract Mean*

dieser Schranken ist das Anzeigen der Amplitudenwerte (in blau), wie es in Abbildung 4.4 in Bild A für eine ungefilterte Seismogrammdarstellung gezeigt wird.

Um den Einfluss des Messrauschens zu minimieren, können die Mittelwerte von den Amplitudenwerten subtrahiert werden. Zum einen ist dies für eine Spur mit *Subtract Mean* möglich, was eine klarere Darstellung von Reflektorschichten nach sich zieht. Zum anderen kann dies auch graphisch mit *Subtract Noise* für die Bilddarstellung durchgeführt werden, indem in einem anzugebenden Pixelbereich der abzuziehende Mittelwert gebildet wird. Dies bewirkt eine deutliche Aufhellung der Seismogrammabbildung, die sich mit größer werdendem Suchbereich für die Mittelwertbildung stärker auswirkt und ebenfalls mit einer deutlicheren Hervorhebung reflektierender Schichtungen einhergeht. Ein Ergebnis im Zusammenspiel dieser beiden Filteroptionen ist in Abbildung 4.4 Bild B zu sehen.

Dieser Effekt läßt sich mit Hilfe des Abschneidens der negativen Schwingungsanteile der Amplitudenwerte (*Suppress Negative Flanks [$<$]* bzw. [$<=$]) noch deutlicher hervorheben. Die nach dem Erreichen des Maximalwertes abfallenden Amplitudenwerte werden weiss dargestellt und heben mit diesem starken Kontrast die darüberliegenden Reflektoren sehr gut hervor. Bei tiefen Eindringungen in Verbindung mit mehreren erkennbaren Schichtungen kann dies gute Ergebnisse erzielen. Für die Daten des Messgebietes ist diese Filterung nicht unbedingt vorteilhaft, da nur ganz vereinzelt Anzeichen von Schichtungen vorhanden sind und das Bild insgesamt deutlich aufgehellt wird (siehe Abbildung 4.4 Bild C).

Des weiteren besteht die Möglichkeit, die Daten mittels eines Bandpassfilters entweder über die Zeit (*Time Domain Filter*) oder frequenzbezogen (*Frequency Domain Filter*) zu filtern. Bei der Wahl der Grenzen sollte die Nutzfrequenz mittig zwischen den Grenzwerten liegen. Dieser Filter hat nur einen unbedeutenden Einfluss auf das Gesamterscheinungsbild der seismischen Darstellung, da die Daten schon während des Empfangs hardwareseitig einen Bandpassfilter durchlaufen haben (siehe Abschnitt 2.6).

Für die Parasound-Seismogrammdarstellungen des Untersuchungsgebietes sind im Folgenden eine Filterkombination von *subtract mean* und *subtract noise* mit einem Suchbereich von 15 Pixel gewählt worden, da so die Reflektoren gut zu erkennen sind und sich trotzdem Aussagen über die Stärke des Reflexionssignals treffen lassen.

4.6 Tiefenfensterkorrektur

Beim Prozessieren der Parasounddaten zeigten sich neben den fehlerhaften Headereinträgen der Positionen auch Fehler für die Angabe des Tiefenfensters, welches zwar von dem Operator der Parasound Messung mit der aktuellen Wassertiefe nachgeführt wurde, während dessen der Headereintrag auf einer Tiefenangabe stehen geblieben ist. Somit sind zwar alle Bodensignale während des Registrierzeitraums aufgenommen worden, können aber nicht im richtigen Tiefenhorizont dargestellt werden (siehe Abbildung 4.5 Bild A).

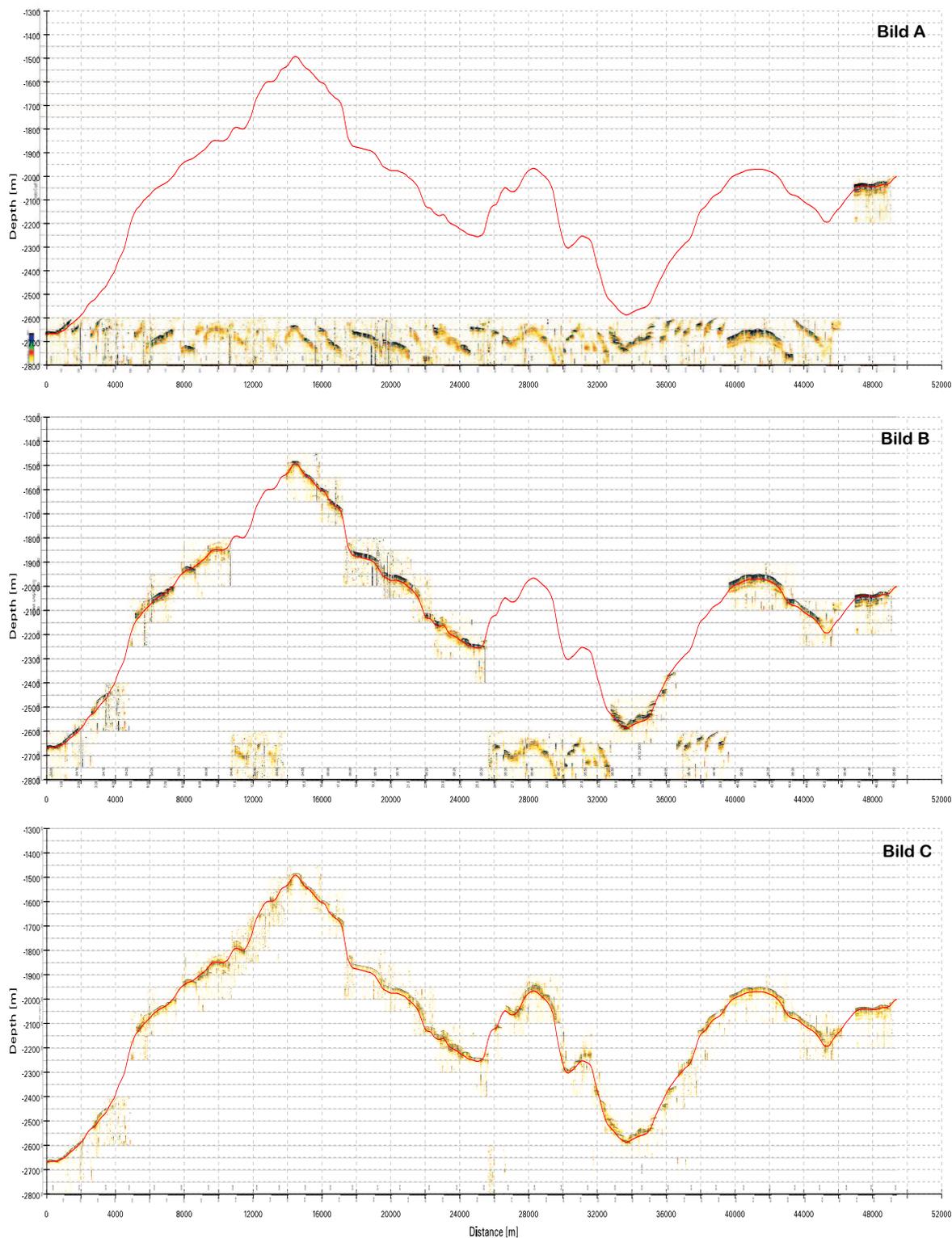


Abbildung 4.5: Beispiel des manuellen Verschieben der Tiefenfenster eines Profils in drei Schritten. Bild A: Ausgangssituation, Bild B: mittlerer Bearbeitungsstand, Bild C: Endresultat (gefiltert)

Grund für diesen Fehler bei der Registrierung des Tiefenfensterwertes ist der Ausfall der Tiefenmessung des NBS-Lotes, welches bei zu großen Hangneigungen nur ein sehr schwaches Streusignal empfängt und die Meeresbodenoberfläche nicht mehr dedektieren und dem Parasoundsystem demzufolge keine Tiefe für den Pilottonmodus übermitteln kann (Niemann, 2003a). Wird dies nicht von dem Parasound Operator rechtzeitig erkannt und das NBS-System neu gestartet, so werden fortan in den Headereintrag der Parasoundtiefe, welche von dem NBS-Signal gestellt wird, und den Eintrag des Tiefenfensters die Werte der letzten regulären Messung hineingeschrieben.

Um die Seismogrammspuren mit dem richtigen Wert für die Einstellung des Tiefenfensters zu versehen, können die normierten Hydrosweep-Tiefen im Header der Parasounddateien als Richtwert genutzt werden. Da dies aber sehr unübersichtlich ist, wurde nach einer graphischen Lösungsmöglichkeit gesucht. Für die Behebung dieses Fehlers konnte das Vorhandensein eines digitalen Geländemodells für dieses Gebiet genutzt werden.

Die Navigationsdaten des fehlerhaften Profilschnittes werden zu diesem Zweck als *line coverage* in ArcInfo eingelesen. Liegen diese in der gleichen Projektion wie das DGM vor, kann mit Hilfe des Befehls *surfaceprofile* ein Profil durch das Geländemodell erstellt werden, welches den Tiefenverlauf entlang des gefahrenen Schifftracks wiedergibt. Die Profildarstellung aus ArcInfo und das Bild des zu bearbeitenden Seismogramms aus SeNT sind in CorelDraw über die gemeinsamen Start- und Endpunkte und den bekannten Tiefenbereich visuell in Übereinstimmung gebracht worden, um so die Verbesserungen der fehlerhaften Tiefenfenstereinträge ablesen und diese dann entsprechend korrigieren zu können. Der in dieser Form abgeleitete Korrekturwert ist wieder über das *Header Edit*-Modul in SeNT manuell verbessert worden. Da dies für jede einzelne Seismogrammspur durchgeführt werden musste, ergab sich wiederum ein beträchtlicher zeitlicher Aufwand.

In Abbildung 4.5 ist die beschriebene Vorgehensweise anhand dreier Bearbeitungsstadien dargestellt. Es wird dabei immer mit den eindeutig zuordbaren Teilstücken eines Parasoundprofils begonnen, deren Versatz aufgrund eines starken Signalbildes oder der markanten Oberflächenform leicht identifizierbar ist. Schwierigkeiten ergeben sich bei sehr schwachen oder stark verrauschten Bildsequenzen, die teilweise nicht verbessert worden sind, da sie nur sehr ungenau wiederhergestellt werden können und auch aufgrund der schlecht zu erkennenden seismischen Aufnahmen eine geringere Aussagekraft besitzen.

5 Gemeinsame Darstellung

5.1 Einhängen der Seismogrammbilder

Für die gemeinsame Darstellung der Parasound Seismogramme und des digitalen Geländemodells bieten sich die Möglichkeiten des vertikalen Einbindens digitaler Bilddateien in *Fledermaus* an. Wie in Abschnitt 3.4 schon beschrieben wurde, liegt das digitale Geländemodell bereits im sd-Format vor. Für das Einbinden von Bilddateien werden von *Fledermaus* unter anderem Tiff-, Jpeg-, Gif-, und Bmp-Bildformate unterstützt.

Diese können unter Kenntnis der Anfangs- und Endkoordinate und dem dargestellten Tiefenbereich georeferenziert eingepasst werden. Zu diesem Zweck müssen die in SeNT streckentreu geplotteten Seismogramme genau auf den darstellenden Bereich gestutzt werden, was mit *Adobe Photoshop* realisiert wurde. Die Koordinaten des Anfangs- und Endpunktes müssen die selbe Projektion besitzen wie das im sd-Format vorliegende DGM.

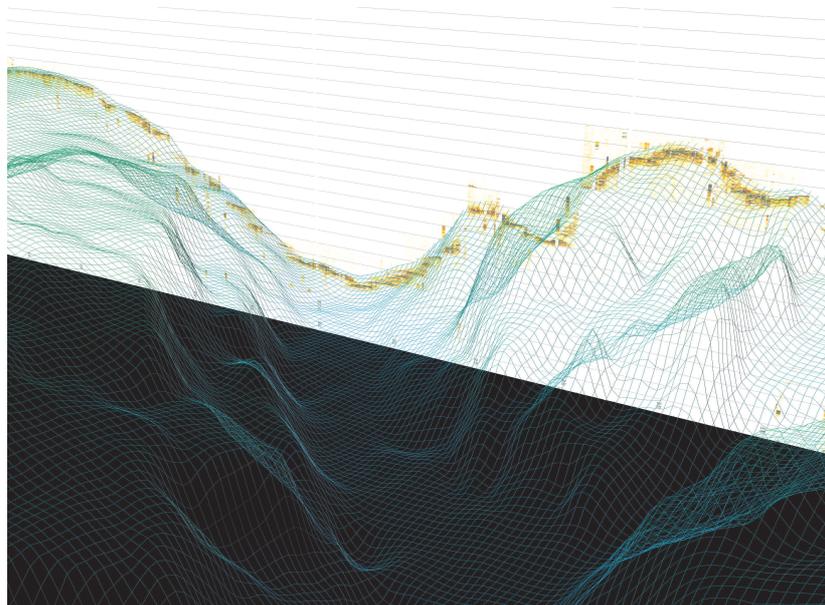


Abbildung 5.1: Darstellung eines in Fledermaus eingehängten Parasound-Seismogrammes

Ein erstes Ergebnis wird in Abbildung 5.1 gezeigt. Die Oberfläche des Geländemodells ist als Gitter dargestellt, um die eingehängten Seismogrammdarstellungen besser betrachten zu können. Eine weitere Möglichkeit ist, die Oberflächenfarben des DGM

innerhalb von Fledermaus mit Transparenz zu versehen, so dass das Parasound-Profil leicht hindurch scheint. Bei geringen Eindringtiefen bietet sich auch eine Verschiebung des Tiefenhorizontes der eingehängten Bilder an, so dass die meeresbodennahen Schichten im Seisomogramm oberhalb der Geländeoberfläche dargestellt werden.

Hauptproblem bei dieser Darstellungsweise ist, dass die Bereiche hinter einem Profil nicht sichtbar sind und demzufolge eine gemeinsame Ansicht mehrerer Parasound-Profile in Verbindung mit der Ansicht der umgebenden Oberflächengestalt des Meeresbodens nicht möglich ist. Um dies zu ermöglichen ist es notwendig die Bildbereiche, die keine Seismogramm-Informationen enthalten, in Fledermaus nicht darstellen zu lassen. Fledermaus hält für solche Anwendungen die *Mask Out Area* Funktion vor mit der maskierte Bildbereiche transparent dargestellt werden können.

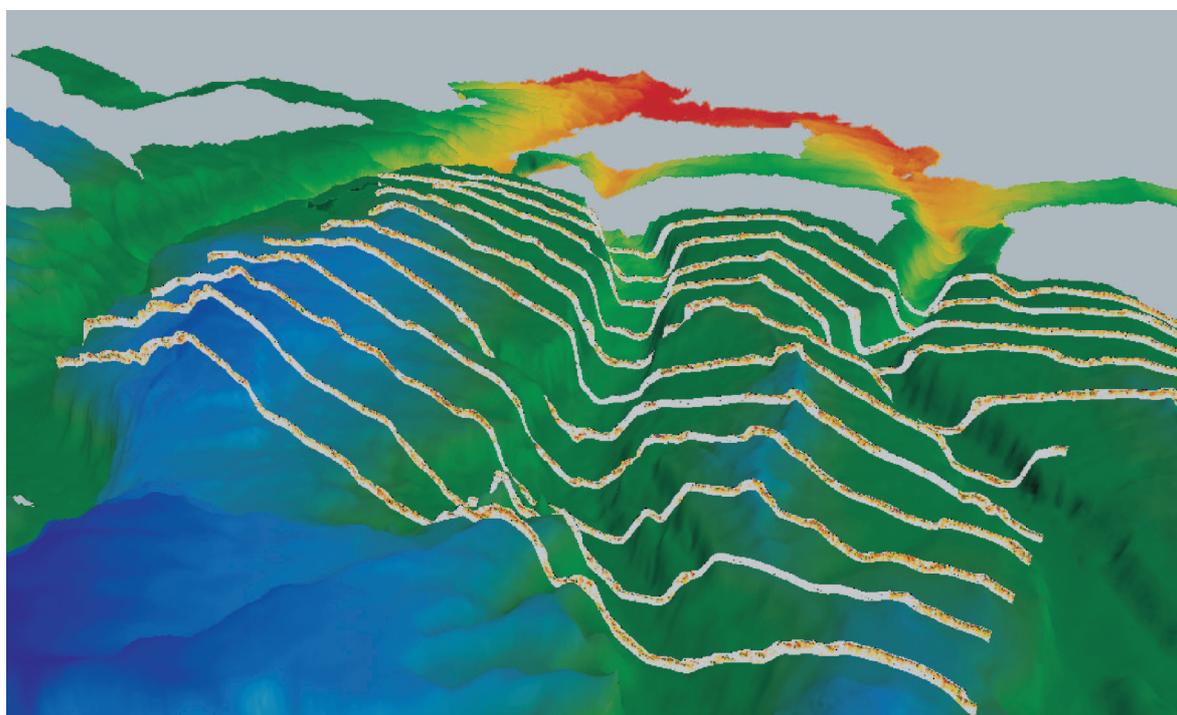


Abbildung 5.2: Darstellung der in Fledermaus eingehängten Parasound-Seismogramme mit Transparenz

In der digitalen Bildbearbeitung werden für das Maskieren von Bereichen eines Bildes sogenannte Alpha-Kanäle genutzt. Dieser Kanal ist als zusätzlicher neben den drei Kanälen der Grundfarben Rot Grün Blau (RGB²⁹) in einer Bilddatei enthalten und kann mit Eigenschaften wie beispielsweise Transparenz für bestimmte Bildebenen und/oder

²⁹Neben dem additiven Farbsystem RGB, welches von Monitoren genutzt wird, gibt es noch das subtraktive CMYK-System, das zur Herstellung von farbigen Druckerzeugnissen verwendet wird. Die Abkürzung leitet sich aus Cyan, Magenta, Yellow nebst einem mit K bezeichneten Schwarzton ab.

-bereiche versehen werden.

In *Adobe Photoshop* ist es möglich, Tiff-Bilder mit transparenten Bereichen abzuspeichern, welche in *Fledermaus* als *Mask Out Area* erkannt werden. Über diese Bearbeitungsweise der Seismogrammbilder werden die Bereiche oberhalb des ersten Meeresbodenreflektors herausgelöscht und nicht mehr dargestellt. Dies bietet die Voraussetzung für eine gemeinsame Darstellung der Meeresbodentopographie und den eingehängten Profilbildern des Parasound-Sedimentecholotes.

Wie Abbildung 5.2 zeigt, passen sich die elf Parasoundprofile aus SeNT gut der Geländeoberflächengestalt des ungeglätteten DGMs an. Aufgrund der nahezu geradlinigen Profilierung der systematischen Vermessung ergeben sich kaum Verzerrungen der in den Seismogrammen wiedergegebenen Abbildung des Meeresbodens.

Bei der manuellen Maskierung der transparenten Bildbereiche zeigte es sich wiederum als Vorteil, die aus dem DGM generierten Profile über die Seismogramme zu legen, da gerade bei Systemausfällen des Parasound-Systems oder bei Passagen an Steilhängen aufgrund zu schlechter Rückstrahlbedingungen der Verlauf des Meeresboden nicht nachvollziehbar ist. Somit konnten beim Auswählen der zu maskierenden Bildbereiche die aus dem DGM generierten Tiefenverläufe der einzelnen Profile als Orientierung genutzt werden.

5.2 Der Navigation folgende Parasound - Darstellungen

Da gerade bei Eisfahrten nicht davon auszugehen ist, dass die Schifftracks einem geradlinigen Verlauf folgen, wäre es wünschenswert, die Seismogramme der Navigation folgend darstellen zu können. Dies kann mit Hilfe des *mkvcurtain*-Befehls in *Fledermaus* umgesetzt werden, indem ein vertikal eingehängtes Bild unter Hinzunahme einer ASCII-Datei, in der Positionen des Schifftracks in der gleichen Projektion wie das DGM enthalten sind, und Angabe des Tiefenbereichs in eine *sd*-Datei umgewandelt wird.

Die angebrachten Navigationsdaten werden gleichabständig über die Bildlänge verteilt, um die Seismogramme dem Trackverlauf anzupassen. Da die Informationen für den Verlauf des Schifftracks aus den Centerbeam-Positionen des Hydrosweep-Fächers abgeleitet wurden, ergaben sich tiefen- und geschwindigkeitsabhängige Schwankungen in der Verteilung der Positionen. Mit einem in C++ geschriebenen Programm *linie*, welches eigens zu diesem Zweck von Sebastian Röber in der Bathymetrie Gruppe des AWI geschrieben worden ist, können Dateien gleichabständiger Linienpunkte generiert werden, welche dem gefahrenen Schiffstrack folgen.

Mit einer solchen Vorgehensweise ist es nun möglich, Seismogramme des Parasound-Sedimentecholotes auch in Bereichen un stetigen Schiffkurses, wie z.B. bei Kurvenfahrten, lagerichtig darzustellen. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 5.3 zu sehen. Der

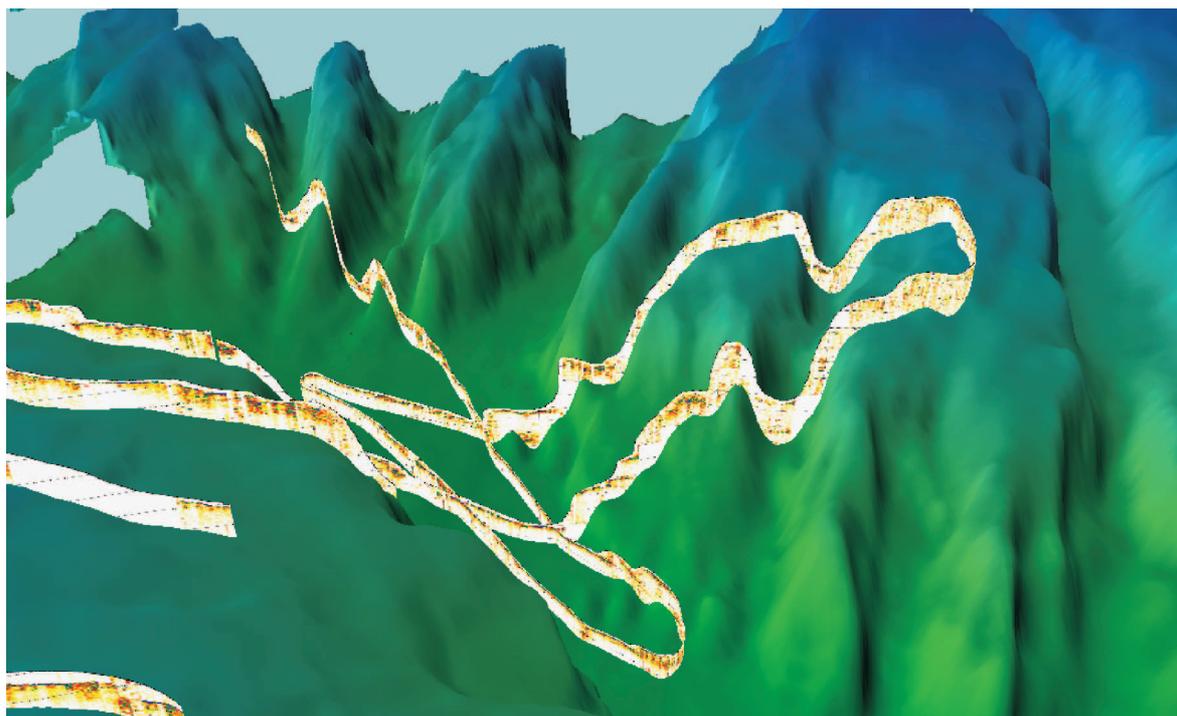


Abbildung 5.3: Darstellung der mit Hilfe des *mkvcurtain*-Befehls in Fledermaus eingehängten Parasound-Seismogramme

Tiefenbereich der Seismogramme ist um 50 m nach oben korrigiert worden, damit die Darstellung der Amplitudenwerte zusammen mit der Oberflächengestalt des Meeresboden dargestellt werden. Es bieten den Vorteil, dass Bereiche interessanter Oberflächenstrukturen auch gleich hinsichtlich der Beschaffenheit des Untergrundes näher betrachtet werden können.

Eine solche Vorgehensweise besitzt insbesondere ihre Vorzüge bei Gebieten starker Tiefenunterschiede und einer geringen Eindringung des parametrischen Signals, wie es in dem hier behandelten Untersuchungsgebiet der Fall ist. Bei tieferer Eindringung der Parasound-Seismogramme und moderaterer Oberflächengestalt des Meeresbodens kann auch eine gemeinsame Darstellung des digitalen Geländemodells und der Seismogrammbilder mit korrekten Tiefenbezug zu gut interpretierbaren Ergebnissen führen.

Für eine detaillierte Betrachtung der Seismogramme ist es dennoch notwendig die Abbildungen mit *Pixel pro Spur* in SeNT zu generieren. Dies würde hinsichtlich einer gemeinsamen 3D-Darstellung in Fledermaus und der Betrachtung von Profilen zu Interpretationszwecken einen erheblichen Mehraufwand bedeuten.

Da die gerasterten (Tiff-)Bilder der Parasound-Seismogramme in *Fledermaus* gleichabständig dem Navigationsverlauf angepasst werden, besteht auch die Möglichkeit mit *Pixel pro Spur* geplotteten Seismogrammdarstellungen und einer Navigationsdatei, die

für jede der einzelnen Seismogrammspuren die konkrete Position enthält, eine *sd*-Datei für das vertikale Einhängen der Parasound-Profile in Fledermaus mit dem *mkvcurtain*-Befehl zu generieren.

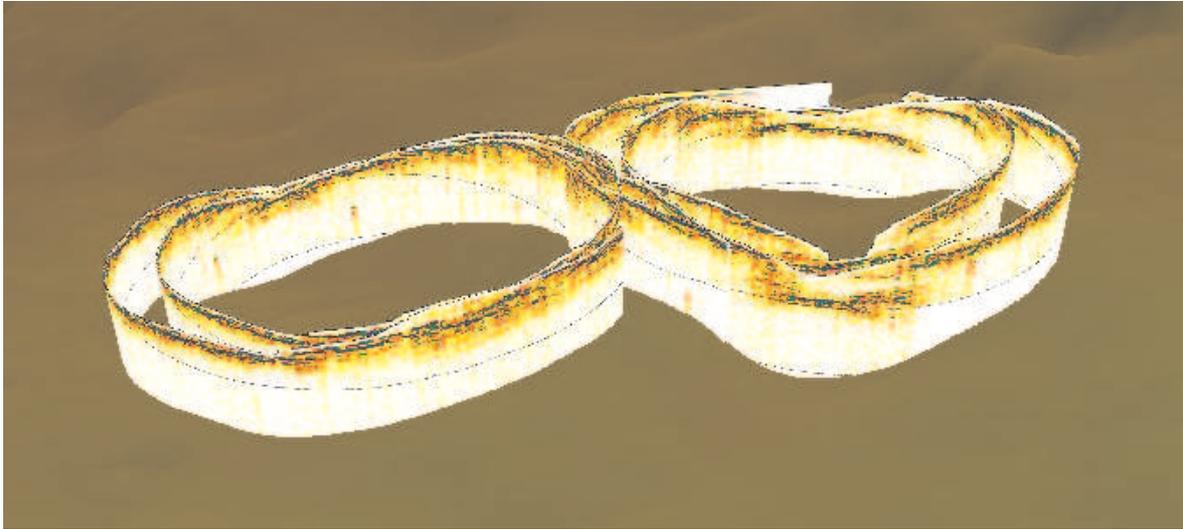


Abbildung 5.4: Beispiel eines nach *Pixel pro Spur* in Fledermaus eingehängten Parasound-Profils

Ein Beispiel dieser Vorgehensweise ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Es wurde aus einem durchgängigen Profilabschnitt erzeugt, der zur Kalibrierung des Bord-Magnetometers bei $68^{\circ}58'S/1^{\circ}47'E$ in Form von zwei angrenzenden gegenläufigen Kreisen gemessen wurde. Es ist zu erkennen, dass die benachbarten Parasound-Seismogramme hinsichtlich des Tiefenhorizontes und auch des Seismogramm-Bildes gut zusammen passen.

Die Positionsdaten der angebrachten Navigationsdatei wurden aus SeNT mit der *Header List*-Option entnommen und in ArcInfo projiziert. Die gute Auflösung der Seismogramme resultiert aus der relativ geringen Fahrtgeschwindigkeit des Schiffes von durchschnittlich 5 kn.

Das größte Problem der gemeinsamen Visualisierung ist die Auflösung der Parasound-Seismogramme, die einerseits schon durch den inhomogenen Schussabstand bedingt ist. Durch die korrekte Interpolation der Navigationsdaten der einzelnen Seismogrammspuren wäre dies noch verbesserungsfähig. Andererseits können auch Informationsverluste aufgrund der gewählten Wege der Generierung der digitalen Bilder und deren Formate auftreten.

5.3 Problem der Bildauflösung und Datenmenge

Um die gemeinsamen Darstellungen des digitalen Geländemodells und der Seismogramme des Sedimentecholotes auch für eine geologische Interpretation nutzen zu können,

muss gewährleistet sein, dass die im digitalen Bildformat vorliegenden seismischen Aufzeichnungen des Parasound-Systems hinsichtlich der Auflösung auch deren Informationsgehalt wiedergeben können. Wünschenswert ist die Darstellung in der Qualität, dass bei Detailansichten des Modells eine Differenzierung zwischen den einzelnen Seismogrammspuren ermöglicht wird.

Die Qualität der digitalen Bilder ist dabei abhängig von den systemseitigen Rechner-einstellungen hinsichtlich der Konfiguration der Bildschirmauflösung, deren Werte zwischen etwa 75 dpi bis 95 dpi liegen können. Ein Screenshot kann die Seismogramme nur so gut auflösen wie sie über die Anzeige des Bildschirms dargestellt werden. Das Abspeichern der in SeNT generierten Seismogramm-Darstellungen in digitalen Bildformaten mit höherer Auflösung (z.B. 300 dpi) bewirkt nur eine Skalierung der Bildabmaße. Bei einer Verdichtung der Pixelinformationen eines Rasterbildes werden dessen Seitenlängen solange gestaucht bis der gewünschte dpi-Wert für die Bildkomposition erreicht ist. Demnach lässt sich die Bildauflösung der seismischen Aufzeichnungen auch durch eine Vergrößerung der in SeNT erstellten Seismogramm-Darstellungen verbessern.

Zu diesem Zweck sind verschiedene Skalierungen der streckentreuen Seismogramm-Abbildungen in SeNT getestet und in das dreidimensionale *Fledermaus*-Modell eingebunden worden. Die besten Resultate ergeben sich dabei mit einer lateralen Skalierung der Seismogramme mit 0.4 km pro 1 cm, bei der 500 Tiefenmeter auf 15 cm in vertikaler Richtung auf dem Bildschirm dargestellt werden. Diese Werte werden auf alle Seismogramme für die weitere Bearbeitung angewendet, um die seismischen Aufzeichnungen der in *Fledermaus* eingebundenen Profile des Parasound-Sedimentecholotes miteinander vergleichen zu können.

Wie Abbildung 5.5 zeigt, lassen sich diese in der Form erstellten Seismogramm-Darstellungen (Bild B) verlustfrei in das sd-Format (Bild A) konvertieren, so dass für das Einbinden von Parasound-Profilen, die der Navigation des Schiffes folgen, ebenfalls ein qualitativ gutes Ergebnis erreicht werden kann. Es zeigt sich, dass in beiden Darstellungsweisen die einzelnen Seismogrammspuren der sedimentechographischen Messungen deutlich voneinander unterschieden werden können. Unter der Voraussetzung einer korrekten Positionszuweisung der einzelnen Spuren kann dies insbesondere bei dem inhomogenen Schussabstand im Pilottonmodus von Interesse sein, um die benachbarten Seismogrammspuren hinsichtlich ihrer Redundanz näher zu untersuchen. Als Beispiel eines eingebundenen Seismogramms geringerer Auflösung, welches mit 1 km pro 1 cm und einer Tiefenskalierung von 500 m auf 10 cm in SeNT erstellt worden ist, wird in Bild C dargestellt. Die einzelnen Spuren der Seismogramme sind nur noch undeutlich zu erkennen, wobei auch das Gesamteindruck hinsichtlich einer Wiedergabe möglicher Strukturen der oberen Sedimentschichten stark beeinträchtigt wird.

Ein sehr großes Problem bei der Erstellung von diesen hochauflösenden Seismogramm-Darstellungen ergibt sich aus den resultierenden Dateigrößen der digitalen Bilder. Da nur das Tiff-Format den für das Maskieren von transparenten Bildbereichen benötigten Alpha-Kanal unterstützt, ergeben sich aufgrund der gewählten Skalierung für die

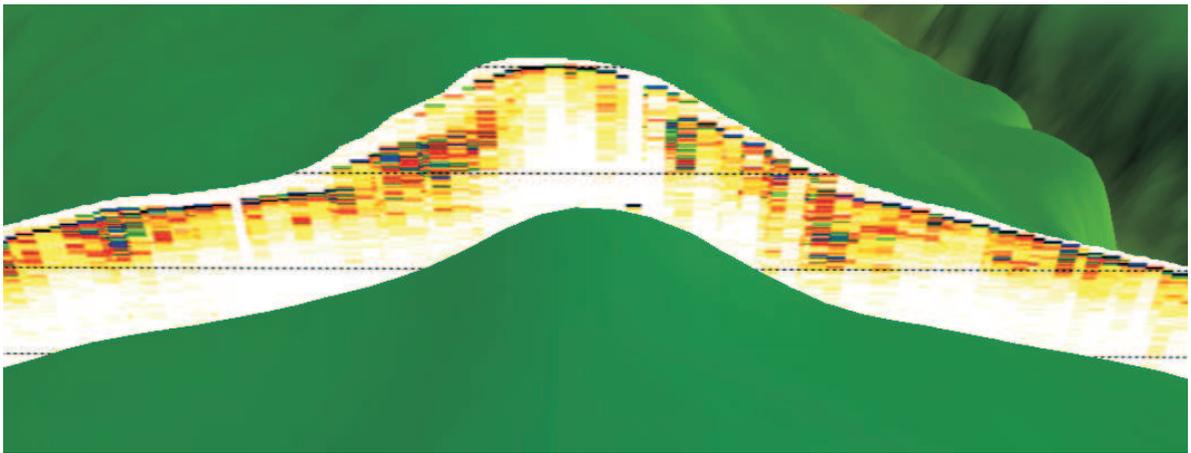


Bild A: sd - Format, groß

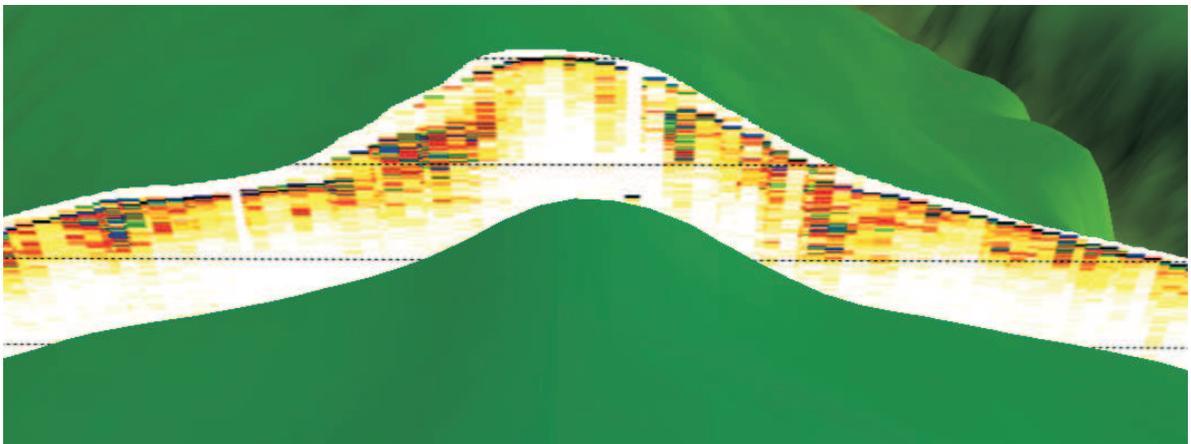


Bild B: tiff - Format, groß

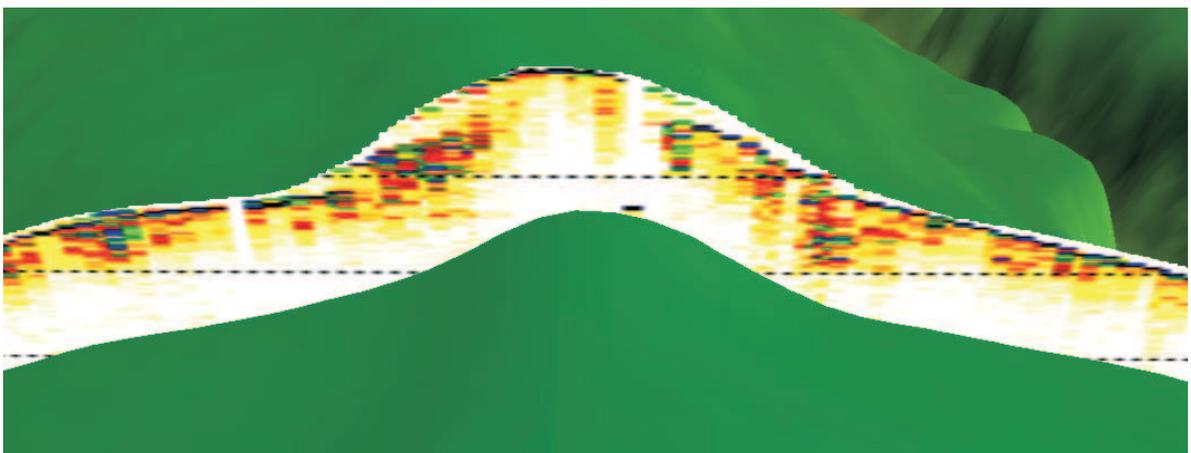


Bild C: tiff - Format, klein

Abbildung 5.5: Vergleich der in *Fledermaus* eingehängten Seismogramm-Darstellungen hinsichtlich der Bildauflösung

einzelnen Profilabbildungen, deren Streckenlängen von rund 40 km bis 80 km mit Tiefenbereichen von etwa 1000 m bis 2000 m variieren, Bilddateien in der Größenordnung von ca. 25 MB bis 50 MB. Zwar lassen sich diese durch verlustfreie Komprimierungsmethoden wie beispielweise LZW (Lemple-Zif-Welch) wegen der großen einfarbigen Bereichen, in denen keine seismischen Informationen dargestellt werden, auf nahezu ein Zehntel verkleinern, doch werden die Seismogramme beim Konvertieren in das sd-Format wieder entpackt, so dass sie im unkomprimierten Datenumfang in das 3D Modell in *Fledermaus* eingehen.

Für eine gemeinsame dreidimensionale Darstellung, in der zusammen mit dem DGM mehrere Seismogramme des Parasounds eingebunden werden, führt dies zu erheblichen Problemen für die Echtzeit-Darstellung beim virtuellen Durchschreiten eines Modells. So wird das im sd-Format vorliegende DGM im Rahmen des in *Fledermaus* für große Datenmengen praktizierten *Renderings* so stark vereinfacht dargestellt, dass der Betrachter gerade in einem Gebiet größer Tiefenunterschiede, beim Durchwandern des Modells leicht die Orientierung verlieren kann. Liegen die seismischen Darstellungen ebenfalls im sd-Format vor, tritt dieser Effekt in abgeschwächter Form auf, da auch diese im Gegensatz zu den vertikal eingehängten Bildern des Tiff-Formates gerendert dargestellt werden können und sich daraus eine bessere 'Performance' des Visualisierungsprogrammes ergibt.

Hinsichtlich einer weiteren Nutzung der in diesem Kapitel beschriebenen gemeinsamen Darstellungsmöglichkeiten in *Fledermaus* müssen Wege gefunden werden, die seismischen Aufzeichnungen des Parasound Sedimentecholotes in einem stärker komprimierten, digitalen Bildformat vorzuhalten, das die erforderlichen Eigenschaften einer hochauflösenden Darstellung und einer möglichen Maskierung von transparenten Bildbereichen besitzt. Für das Aufzeigen von Lösungsansätze könnten evtl. schon durchgeführte Untersuchungen hinsichtlich des Einsatzes von Datenkomprimierungsmethoden bei gerasterten Aufnahmen im Bereich der Photogrammetrie herangezogen werden. Desweiteren wird es notwendig sein sich eingehend mit Möglichkeitenden der digitalen Bildverarbeitung auseinander zu setzen, was in Rahmen dieser Arbeit aus Zeitgründen nur ansatzweise möglich ist.

6 Interpretation der Ergebnisse

6.1 Typische Echoformen

In diesem Abschnitt sollen die verschiedenen im Messgebiet auftretenden Seismogramm-Echotypen vorgestellt werden. Eine Klassifizierung der einzelnen Echotypen unter geologischen Gesichtspunkten wird an dieser Stelle nicht durchgeführt, wobei trotzdem die von Damuth und Hayes (1977) eingeführte Nomenklatur der Echotypen, wie sie in Spieß (1993) dargelegt worden ist, als Orientierung für die weiteren Ausführungen genutzt werden soll.

Für die Darstellung der unterschiedlichen Echoformen werden die Seismogramme in SeNT wiederum mit *Pixel pro Spur* abgespielt, um eine möglichst gute Auflösung gewährleisten zu können.

Allgemein lassen sich die verschiedenen Signaltypen in zwei Gruppen, die **deutlichen** ('distinct') und die **undeutlichen** ('indistinct') Echos, einordnen, wobei sich das Einteilen der Seismogramm-Abbildungen in drei Hauptklassen etabliert hat.

Die erste Klasse (**I**) bilden Seismogrammaufnahmen, die den Meeresboden mit einem scharf abgegrenzten Echosignal deutlich abbilden. Sie können anhand des Nichtvorhandenseins (**Ia**) oder Auftretens (**Ib**) weiterer Reflektoren innerhalb der Sedimentsäule wiederum unterteilt werden.

Die zweite und dritte Klasse rekrutiert sich aus der Gruppe der undeutlichen Echos. Es wird zwischen kontinuierlich, **ausgedehnten** ('prolonged') der Klasse **II** und den **hyperbolischen** ('hyperbolic') Signalen der Klasse **III** unterschieden. Die ausgedehnten Echos lassen sich erneut in diffuse Bodenechos ohne oder mit nur gelegentlichen subparallelen ausgedehnten Echosignalen (**IIa**) und die weniger stark verschmierten Echos mit diffusen internen Reflexionen (**IIb**) unterteilen (Spieß, 1993).

Die Übergänge dieser Klassen für Signalechos niederfrequenter Sedimentecholotsysteme sind fließend. Es soll in diesem Abschnitt nur eine prinzipielle Einordnung der Echotypen des Untersuchungsgebietes erfolgen, um über charakteristische Seismogrammabbildungen dem Messgebiet Eigenschaften bestimmter Ablagerungsräume zuordnen zu können.

Die dritte Klasse der hyperbolischen Echos wird aufgrund des Auftretens in Gebieten rauher Meeresbodenmorphologie und der darin begründeten Variantenvielfalt ihrer Ausbildung in sechs weitere Unterklassen aufgeteilt, die hier nicht einzeln aufgeführt werden sollen.

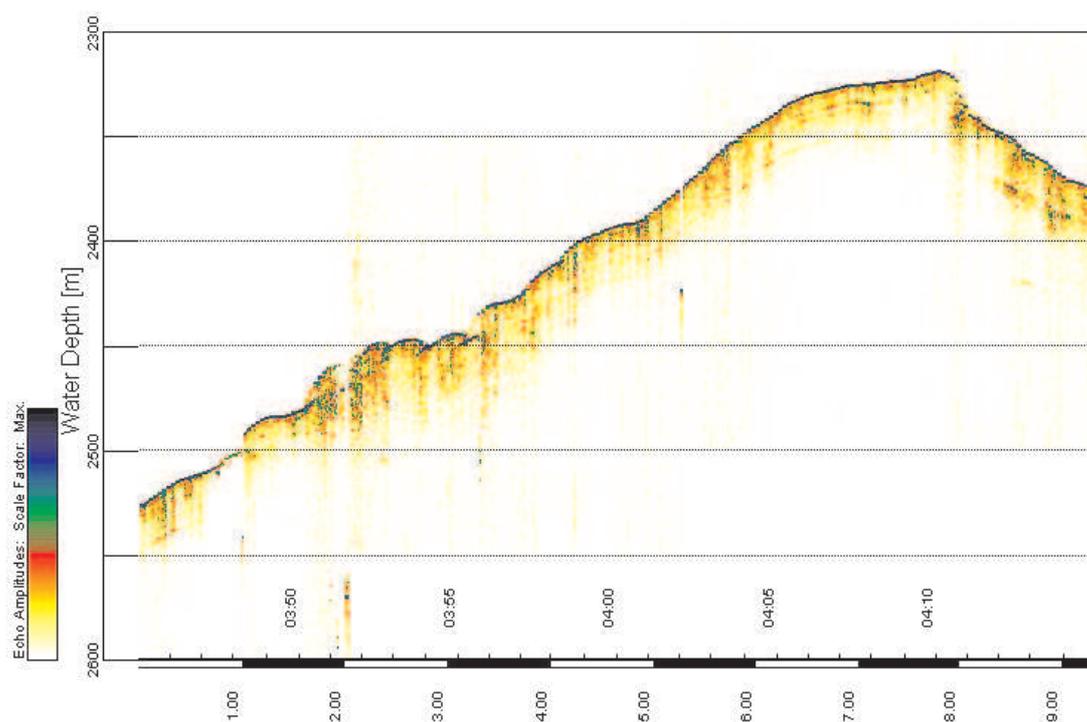


Abbildung 6.1: Beispiel eines Parasound-Profiles einer Mischform des deutlichen **Ia**-Typs und hyperbolischen Echos.

Der Echotyp **Ia** der ersten Klasse tritt in Schelfregionen mit verfestigten Sedimentschichten auf, die sich aus feinen Materialien wie Silt und Ton zu einem starken Bodenreflektor zusammengeschiedet haben. Deutliche Mehrfach-Reflektoren (**Ib**) mit großen Eindringtiefen sind vorwiegend bei feinkörnigen Sedimenten in Teilen der Tiefseeebenen, am unteren Kontinentalhang oder größeren Eintragsgebieten wie z.B. Flussdeltas zu finden.

Abbildung 6.1 stellt ein Beispiel dar, in dem der Meeresbodenreflektor deutlich angezeigt wird. Die Signalbilder im Untersuchungsgebiet sind in der Regel nicht beständig und wechseln kleinräumig aufgrund der bewegten Gestalt des Meeresbodens. Beim Streckenpunkt³⁰ von etwa 2 km sind einige hyperbolische Echos zu erkennen, die den ersten Reflektor wesentlich undeutlicher erkennen lassen. Die bei geringer Hangneigung auftretenden Signal-Hyperbeln lassen auf Feinstrukturen der Oberfläche schließen, die durch spezifische Ablagerungs- und Erosionsprozesse entstanden sein könnten (Damuth & Hayes, 1977).

³⁰Bei den abgebildeten Seismogrammen aus SeNT werden die Strecken ab Startzeitpunkt unterhalb der Horizontalen Skala in km angegeben. Oberhalb dieser Achse sind die Uhrzeiten (Bordzeit) aufgetragen. In der Vertikalen wird die auf 1500 m/s normierte Wassertiefe angegeben.

Die durch breite Reflexionsbänder gekennzeichneten, ausgedehnten Echotypen der Klasse **II** besitzen die weiteste Verbreitung und sind beispielsweise an Kontinentalhängen anzutreffen. Ihre Erscheinungsform ist in erster Linie von dem Grobfraktionsanteil der Oberflächensedimente abhängig (Damuth & Hayes, 1977). Diese Gruppierung des Echotyps dominiert auch in dem zugrunde liegenden Untersuchungsgebiet.

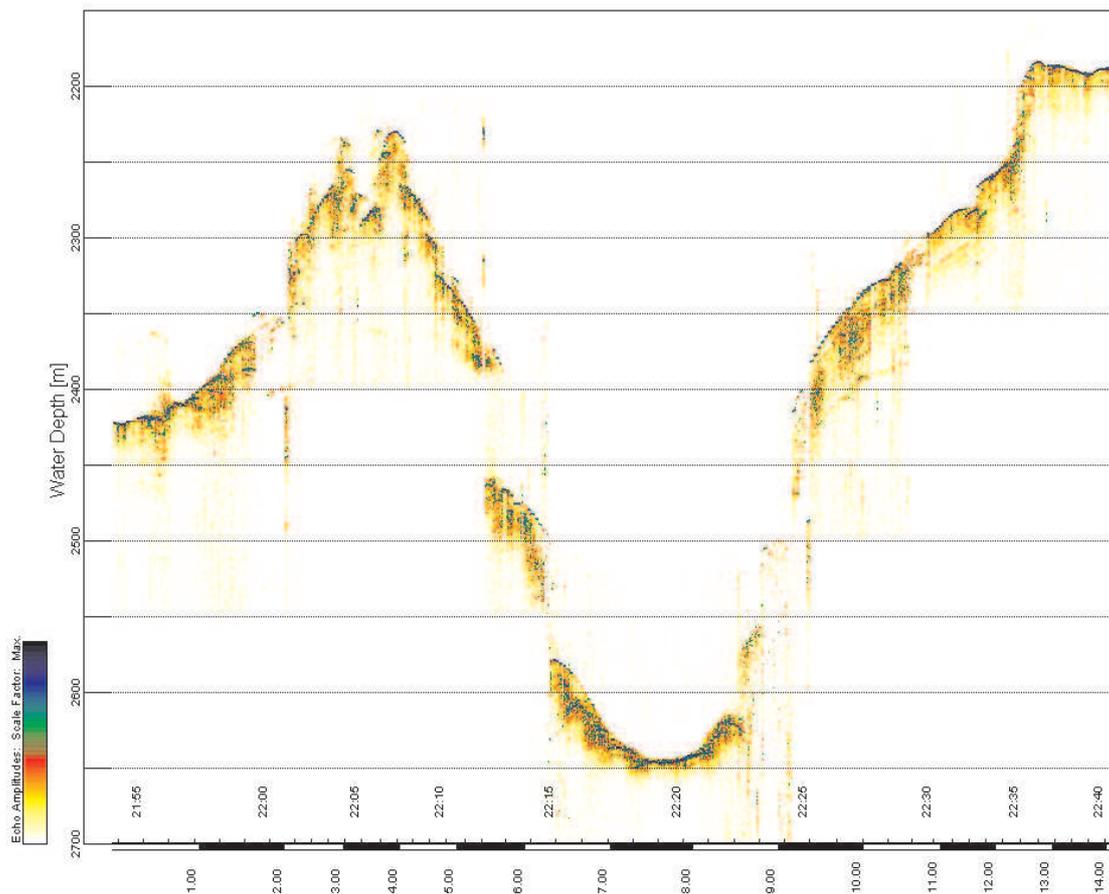


Abbildung 6.2: Beispiel eines Seismogrammes des Echotyps **IIa**

Wie in Abbildung 6.2 zu sehen ist, kann der oberste Bodenreflektor nur noch schwer von dem tiefer eindringenden Teil des Seismogramms unterschieden werden (Typ **IIa**). Der relativ ebene Teilabschnitt der Talsohle weist eine geringere Eindringung des Signals in den Untergrund auf. Dieser starke Reflektor läßt auf kompakt verfestigte Sedimente schließen.

Bei Streckenkilometer zwei und drei zeichnen sich auch sehr klar einzeln stehende Hyperbelen ab, welche die Kuppen des Levee-Rückens stark überzeichnen. Das Auftreten solcher Echos ist typisch für submarine Canyon-Systeme am Kontinentalhang. Alle

Diskontinuitäten der Oberfläche wie die Spitzen von Erhebungen oder Kanten linearer Strukturen wirken als Quelle von Diffraktionen³¹, solange diese im Schallkegel des Echolotes liegen (Spieß, 1993).

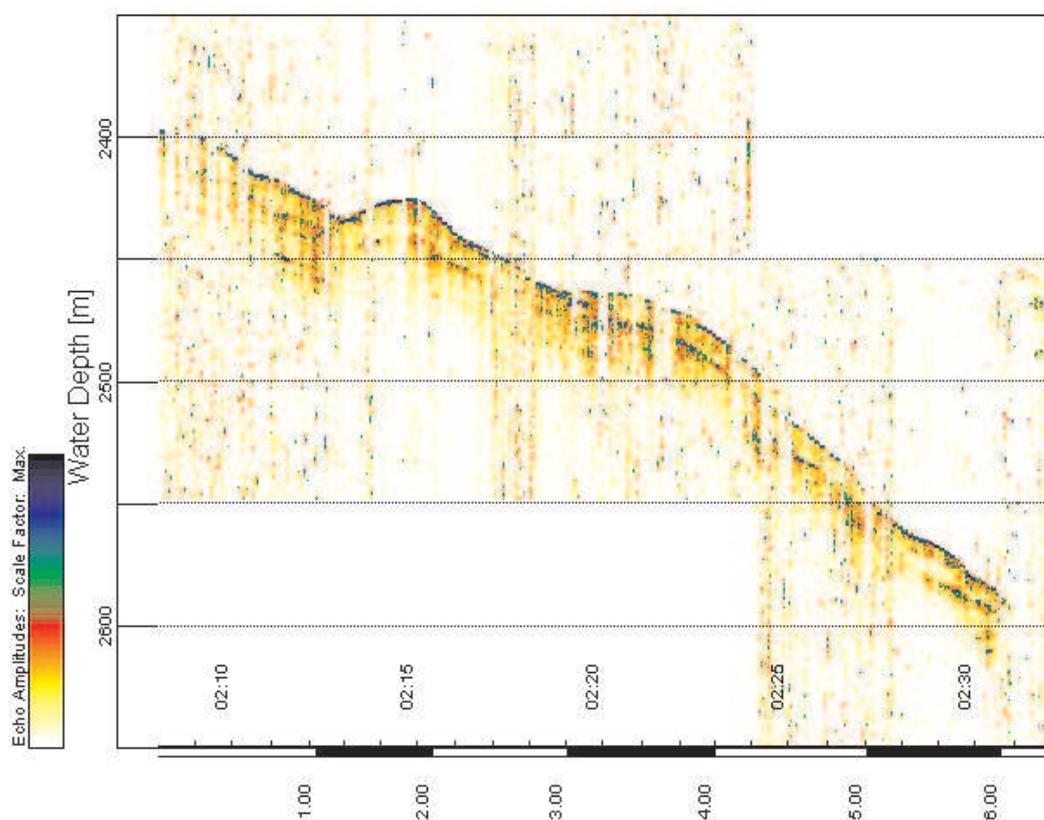


Abbildung 6.3: Beispiel des nur selten auftretenden Echotyps **IIb**

Der nur regional an der Ost-Flanke eines Levees auftretende Echotyp **IIb** ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Es sind diffuse interne Reflexionen in der erfassten Sedimentschicht zu erkennen. Das Seismogramm weist auch Gesamtrauschen im größeren Umfang auf, was die Darstellung der einsetzenden Schichtungen nachteilig beeinflusst.

Bei der Prozessierung der Parasound-Daten konnte insgesamt ein Ansteigen des Messrauschens bei den im westlichen Teil des Messgebietes profilierten Seismogrammdarstellungen festgestellt werden, was sich auf das Verschlechtern des Signal-Rausch-Verhältnisses in Folge von Messfahrten im Eis zurück zu führen läßt. Dies bestätigt sich darin, dass in dem Zeitraum der Messfahrt nahezu der gesamte Kontinentalrand vom 'Filchner Trog' bis hin zu 2° E mit Eis bedeckt gewesen ist (Calcara & Jokat, 2003). Diese Beschreibung der Gebietsgrenze deckt sich hinreichend mit den Erkenntnissen aus den

³¹Diffraktion: Beugung von Wellen (*Phys.*)

Parasound-Seismogrammen.

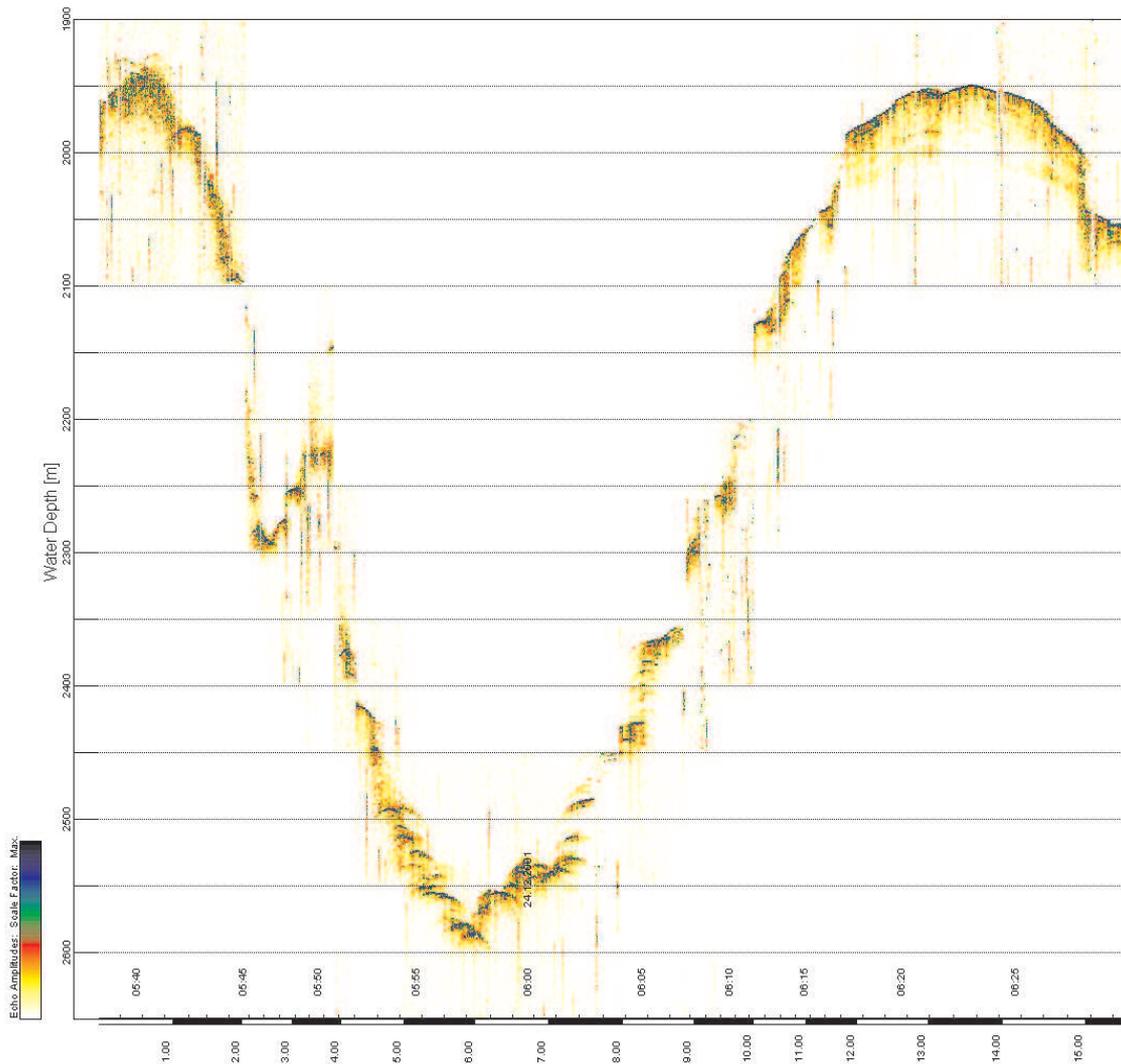


Abbildung 6.4: Beispiel für multiple hyperbolische Echos im Sohlenbereich eines Canyons

Abbildung 6.4 zeigt überlappende, unregelmäßig verteilte Hyperbeln mit stark variierenden Wassertiefen der Scheitelpunkte im Bereich einer Talsohle des zentralen Canyons. Diese Struktur des seismischen Profils lässt auf ein kleinräumig stark gegliedertes Gelände schließen, das aus Rutschungen wie z.B. Turbidite hervorgegangen sein könnte.

Eine Turbiditlage entsteht durch Ablagerung der Sedimentfracht eines Suspensionsstromes (Schlammrutschung), der sich mit hoher Geschwindigkeit hangabwärts bewegt (Spieß, 1993). Diese Schlammrutschungen können auch durch Erdbeben angeregt werden (Seibold & Berger, 1996).

Die dabei in Bewegung gesetzten Erdmassen setzen sich mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit sortiert nach ihrer unterschiedlichen Schwere der Körner ab (Gradierung). In Abbildung 6.5 ist eine komplette Gradierung einer idealen Turbiditlage schematisch dargestellt. Beginnend mit A setzen sich als erstes die grobkörnigen Kies- und Sandpartikel ab. Mit abnehmender Fließgeschwindigkeit des Suspensionsstromes fällt immer feinkörnigeres Material über (Mittel-) Feinsand bis hin zu Ton und Silt aus und lagert sich am Meeresboden ab.

	Korngröße	Strukturen
E	Silt-Ton	Fein laminiert bis ungeschichtet
D	Feinsand-Silt	laminiert
C	Mittel-Feinsand	Rippeln, Wickelstrukturen
B	Mittel-Feinsand	laminiert
A	Kies-Sand	massiv, deutlich gradiert

Abbildung 6.5: Komplette Gradierung einer idealen Turbiditlage (Völker, 2002)

Neben den hyperbolischen Echosignalen wird anhand der Abbildung 6.4 auch beispielhaft das Versiegen der Reflexionssignale des Meeresboden im Bereich großer Hangneigungen gezeigt. Mit zunehmender Steigung werden die seismischen Aufnahmen aufgrund der Signalstreuung im zunehmenden Maße verrauschter bis es letztlich zu keinem Empfang der Bodenreflektion mehr kommt.

Gerade in stark strukturierten Gebieten müssen solche neigungsabhängigen Aspekte der Seismogrammdarstellungen des Parasound-Systems hinsichtlich einer geologischen Einordnung der Sedimentationseigenschaften eines Gebietes berücksichtigt werden. Da die aus den Parasound-Profil ersichtliche Hangneigung entlang des Schifftracks nicht immer das stärkste Gefälle in einem Gebiet repräsentieren muss, kann es ohne die Hinzunahme flächenhafter Tiefeninformationen auch zu Fehlinterpretationen kommen.

6.2 Schlussfolgerungen

Die gemeinsame Darstellung der sedimentechographischen Parasound-Profile in Verbindung mit dem aus den Messungen des Hydrosweep-Fächersonars generierten digitalen Geländemodell in *Fledermaus* vermittelt neue Einblicke und ein besseres gegenseitiges Verständnis der Messergebnisse.

Bei der gemeinsamen Betrachtung lassen sich in den Parasound-Seismogrammen auftretenden Echotypen anhand der kleinräumigen Meeresbodengestalt besser einordnen und sind ggf. auch auf konkrete Oberflächenformen zurück zu führen. Durch die Wiedergabe des Trackplots in Form der vertikal eingehängten Seismogrammbilder des Parasounds erhält der Betrachter einen sehr guten Eindruck über die Abhängigkeit der seismischen Aufnahmen von den morphologischen Strukturen des Meeresboden.

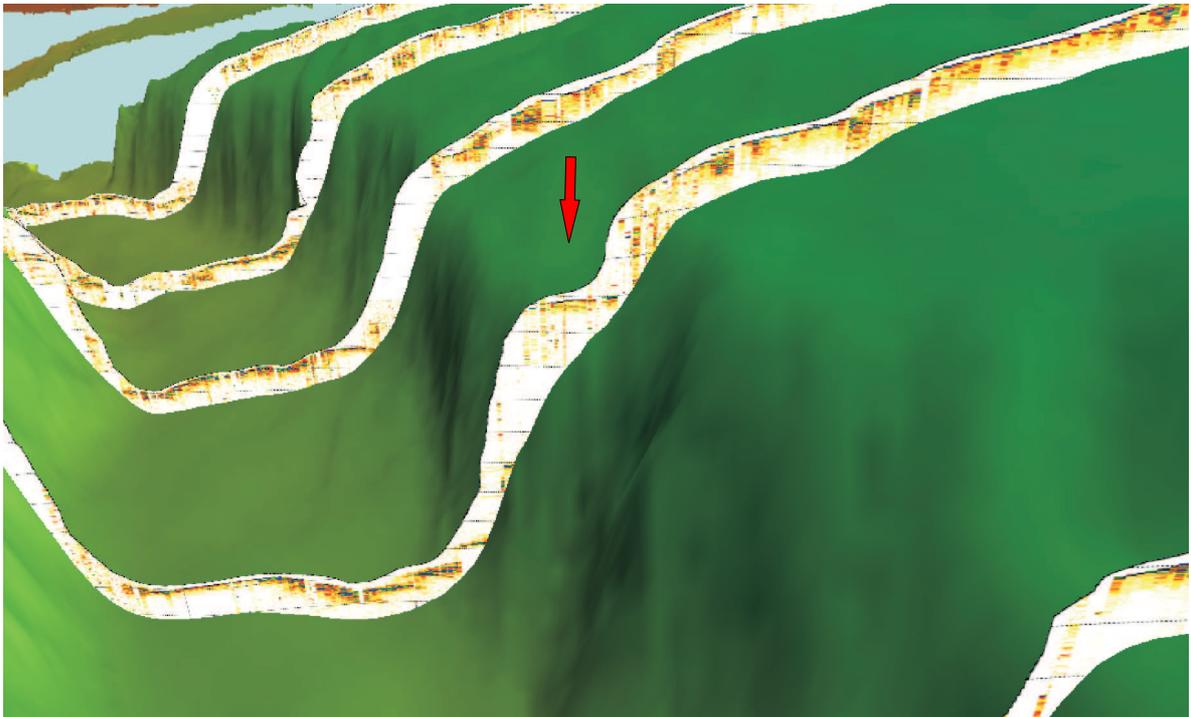


Abbildung 6.6: Darstellung einer Sedimentwelle aus Fledermaus

Die Abbildung 6.6 zeigt im vorderen Parasound-Seismogramm einen Profilverlauf, der im direkten Vergleich mit einem Tiefenschnitt im Geländemodell als Fehlecho gedeutet werden kann. Erst in der dreidimensionalen Darstellung kann der ansatzweise hyperbolische Verlauf des Bodenreflektors im Seismogramm durch die gewellte Ausformung des Steilhängs begründet werden. Die sich im Footprint des Parasound-Echolotes befindliche 'Sedimentwelle' im Steilhang verursacht dabei die auf Diffraktion beruhende Signalhyperbel in dem abgebildeten Seismogramm.

Ebenso können die in den Seismogrammen dargestellten Strukturen des Untergrundes zur Entstehung der Oberflächengestalt des Meeresbodens erklärend beitragen. Wie in Abbildung 6.7 veranschaulicht wird, können einschneidende Vertiefungen von Levees aufgrund des Auftretens von sich mehrfach überlagernden hyperbolischer Echos in Talsohlenbereich, die charakteristisch für Turbididlagen sind, auf Rutschungen zurückgeführt werden.

Anhand der gemessenen Parasound-Profile lassen sich auch regionale Unterschiede hin-

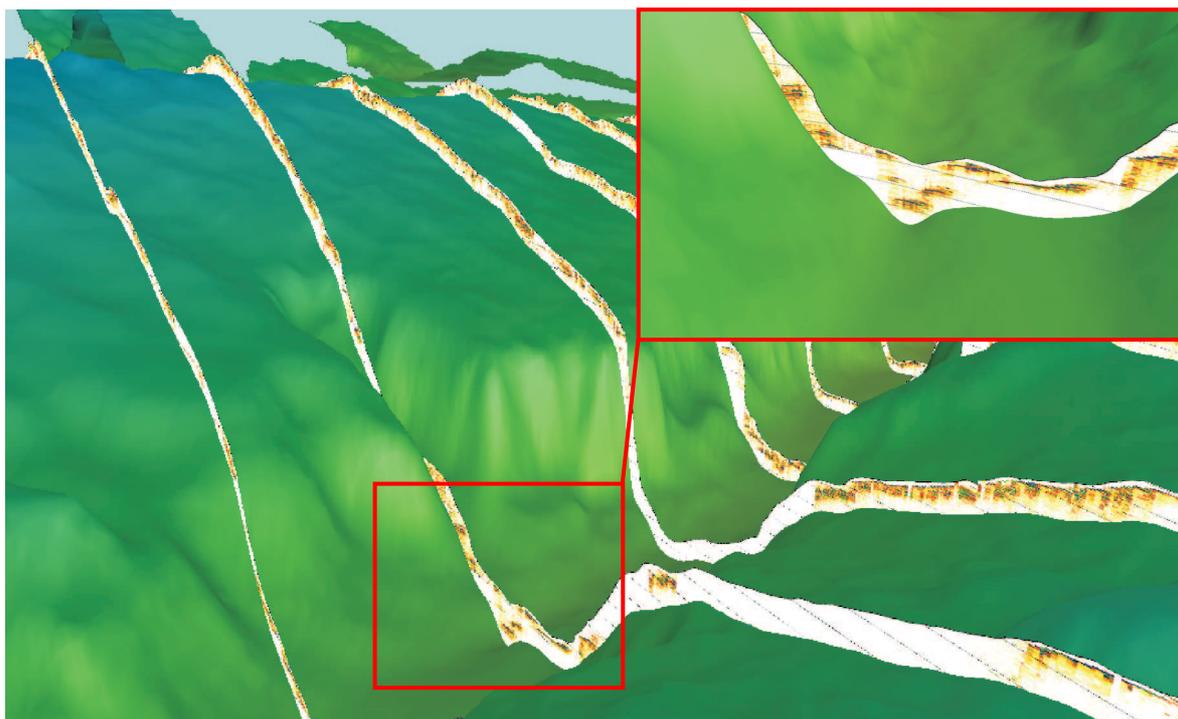


Abbildung 6.7: Einschnitt im Gelände, der auf einen Suspensionsstrom zurück geführt werden kann, da im Talsohlenbereich Anzeichen einer Turbiditlage zu erkennen sind.

sichtlich der Ablagerung der mit den Tiefenwasser eingetragenen Sedimentfracht, die auch einer Gradierung unterliegt, erkennen. So dominieren in dem schelfnahen Bereich die undeutlichen Echos des Typs **II**, welche auf eine gröbere Körnung der Meeresbodensedimente schließen läßt (Kuhn & Weber, 1993).

Je weiter die Parasound-Profile von der Schelfeiskante entfernt sind, um so deutlicher ist der erste Bodenreflektor zu erkennen. In den flachen Teilabschnitten der weiter im Norden des systematischen vermessenen Gebietes gelegenen Levees können wegen der besseren Eindringung mitunter auch Schichtungen in den Seismogrammdarstellungen erkannt werden.

Diese Eigenschaften der seismischen Aufnahmen sind in erster Linie auf feinförnigere Materialien zurück zu führen, die sich mit vermindernder Strömungsgeschwindigkeit absetzen und am Meeresboden sedimentieren.

Die in Abschnitt 6.1 aufgeführten Echotypen des Untersuchungsgebietes und den hier aufgeführten Erkenntnissen lassen auf eine strömungskontrollierte Sedimentation schließen, die nur von durch Rutschungen entstandene Turbeditlagen gestört sind, welche sich in Form von hyperbolischen Echos in den Seismogrammdarstellungen zeigen.

Da dieser Echotyp insbesondere entlang der zwei großen profilierten Canyons anzutreffen ist, muss davon ausgegangen werden, dass es aufgrund der vorhandenen steilen Hänge des öfteren zu Rutschungen im Bereich der Canyons kommt.

Es können somit aus den Daten des Parasound Sedimentecholotes keine konkreten Anzeichen einzelner submariner Rutschungen in den Gebiet benannt werden, die im direkten zeitlichen Zusammenhang mit den am 22. Juli registrierten seismologischen Ereignissen (Abschnitt 1.2) stehen könnten.

Als einziges Indiz für mögliche submarine Rutschungen jüngeren Ursprungs könnte die in Abbildung 3.18 dargestellte Geländeform benannt werden, die sich an der berechneten Position des zweiten starken seismologischen Signals befindet.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Die in dieser Arbeit aufbereiteten bathymetrischen und sedimentechographischen Daten wurden für eine gemeinsame Darstellung in einem dreidimensionalen Modell, bestehend aus dem DGM und den vertikal eingepassten Seismogramm-Bildern des Parasound-Sedimentecholotes, georeferenziert zusammen eingebunden. Diese Verknüpfung der Daten beider Messungen bietet neue Möglichkeiten bei der Interpretation von Seismogrammen der Sedimentechographie. Da auch kleinräumigere Strukturen sich dadurch noch gut darstellen lassen, kann dem Betrachter ein detaillierter Eindruck des Untersuchungsgebietes vermittelt werden.

Für zukünftige Auswertungen systematisch profilierter Messungen des Sedimentecholotes kann eine in der Form mit bathymetrischen Tiefendaten kombinierte Darstellung der Ergebnisse als nützliches Werkzeug zur Interpretation der in den Seismogrammen auftretenden Echotypen und den daraus abzuleitenden Sedimentationsprozesse angesehen werden.

Die im Rahmen der Aufbereitung der Fächersonarmessungen erstellte bathymetrische Karte konnte anschließend als wertvolle Planungsgrundlage für das Prozessieren der Parasound-Seismogramme genutzt werden.

Für die Umsetzung des dreidimensionalen Modells aus den gemessenen Daten waren drei übergeordnete Arbeitsschritte notwendig: die Aufarbeitung und Visualisierung der Fächerlotdaten, die Prozessierung der Parasound-Daten und die Erstellung der gemeinsamen Darstellung.

Aufbereitung und Visualisierung der Fächerlotdaten

Die Aufbereitung der bathymetrischen Daten umfasste die Plausibilisierung der Messungen mit dem Programm Caris Hips und die Berechnung des digitalen Geländemodells in ArcInfo.

Bei der Bereinigung der Navigationsdaten zeigten sich Unstimmigkeiten, die nach vorangegangener Ursachenforschung unter Ausnutzung der Funktionalitäten von Caris Hips behoben werden konnten. Die aus den in unterschiedlichen Datenformaten vorliegenden Messungen begründete getrennte Bearbeitung im *Subset-Editor* hatte neben einem Mehraufwand auch den Nachteil, dass nicht die Daten aller Fahrten zusammen betrachtet werden konnten.

Mit der zur Tiefenbereinigung eingesetzte *Auto Classification* konnten gute Ergebnisse hinsichtlich der Eliminierung von groben Tiefenfehlern erzielt werden, was diese Methode für zukünftige Anwendungen interessant erscheinen läßt.

Zur Herleitung des digitalen Geländemodells wurde innerhalb des ArcInfo-Programmes die Berechnungsmethode *Inverse Distance Weighting* angewendet. Die Untersuchung der Abbildungsgenauigkeit des digitalen Geländemodells ergab in einem Testgebiet eine empirische Standardabweichung von maximal 0.9 % der Wassertiefe und liegt somit im Rahmen der vom Hersteller angegebenen Messgenauigkeit der Tiefenwerte von 1 % durch das Hydrosweep-Fächersonar.

Für die Ableitung von Tiefenlinien wurde das Geländemodell zusätzlich neigungsabhängig geglättet, um den Verlauf der daraus resultierenden Isolinien zu homogenisieren. Ein Vergleich dieser beiden vorliegenden DGMs zeigte, dass sich für die weiteren Anwendungen das ungeglättete Modell empfiehlt, welches im Gegensatz zum geglätteten auch noch kleinere Strukturen abbilden kann.

Die bereinigten Tiefendaten der bathymetrischen Vermessungen der Fahrten ANT IX-3, ANT X-2 und ANT XIX-2 wurden in Form einer bathymetrischen Karte im Massstab 1 : 250 000 für den Bereich von 69°50' S/0° E bis 70° 10' S/4° E dargestellt.

Prozessierung der Parasound-Daten

Die Aufbereitung der im binären PS3-Format vorliegenden Parasound-Aufzeichnungen konnten mit dem Programm SeNT für die georeferenzierte Darstellung der Seismogramme durchgeführt werden.

Aufgrund der mangelhaften Qualität der Headereinträge für die Navigationsdaten, der zeitweise fehlerhaften Zuordnung der Tiefenhorizonte in Folge von falschen Einträge für das Tiefenfenster und der nur beschränkten Einsetzbarkeit der automatisierten Funktionalitäten der SeNT-Software musste die Bereinigung der Parasound-Daten manuell durchgeführt werden, was einen erheblich Zeitaufwand mit sich brachte.

Für eine bessere Darstellung der Seismogramme wurden die von Fehlpositionen bereinigten Parasound-Daten in SeNT gefiltert und für die weitere Verarbeitung in streckentreu ausgeplotteter Form als digitale Bilder extrahiert.

Zu Interpretationszwecken sind aufgrund der homogeneren Bildkomposition jedoch weiterhin die mit *Pixel pro Spur* abgespielten Seismogramme den streckentreuen Darstellungen vorzuziehen, die sich ebenso als Vorlagen für das anschließende georeferenzierte Einbinden in das digitale Geländemodell eignen.

Gemeinsame dreidimensionale Visualisierung

Die gemeinsame Darstellung der Seismogramme des Parasound-Sedimentecholotes und des digitalen Geländemodells konnte mit der 3D-Visualisierungs-Software *Fledermaus* realisiert werden. Über das vertikale Einhängen der Parasound-Seismogramme als digitale Bilddatei oder mit Hilfe des generierten sd-Formates konnten verschiedene Wege einer georeferenzierten Darstellungsmöglichkeit der im digitalen Bildformat vorliegenden Seismogramme aufgezeigt werden.

Um mehrere benachbarte Parasound-Profile zusammen in dem Modell betrachten zu können, mussten die ohne seismische Informationen versehenen Bildbereiche oberhalb des ersten Bodenreflektors in *Adobe Photoshop* als transparent maskiert werden, damit diese in *Fledermaus* nicht mehr dargestellt werden können.

Es wurden die Seismogramm-Aufzeichnungen von elf parallelen Profilen der systematischen Vermessung und einige exemplarische Profilausschnitte mit einer Gesamtlänge von etwa 600 km in das digitale Geländemodell eingebunden.

Das gemeinsame dreidimensionale Modell in *Fledermaus* eignet sich gut für die Interpretation der Parasound-Daten und kann für das Verständnis besonderer Geländeformen interessante Betrachtungsperspektiven und mit Hilfe der Seismogramm-Darstellungen auch Erklärungsansätze aufweisen. Eine Darstellung der Messergebnisse in dieser Form trägt zum besseren gegenseitigen Verständnis der beiden Messungen bei und fördert somit auch bei Forschungsprojekten die interdisziplinäre Zusammenarbeit unterschiedlicher wissenschaftlicher Fachrichtungen.

7.2 Ausblick

Die im Rahmen dieser Diplomarbeit aufgezeigten Möglichkeiten der gemeinsamen Darstellung von bathymetrischen Tiefendaten in Form eines DGMs und der Seismogramme der Sedimentechographie in dem 3D-Visualisierungsprogramm *Fledermaus* können nur als erster Schritt verstanden werden. Um die Vorteile dieser kombinierten Betrachtungsweise evtl. auch standardmäßig für Analysezwecke nutzen zu können, bedarf es der Lösung mehrerer Probleme.

Um die Seismogramm-Informationen des Sedimentecholotes auch lagerichtig abbilden zu können, muss gewährleistet sein, dass jeder Seismogrammspur auch eine konkrete Position zugewiesen wird. Dies kann durch ein Interpolationsverfahren, wie es beispielsweise durch FIELAX für Daten des Sedimentecholot-System Parasound angeboten wird, umgesetzt werden.

Eine weitere Herausforderung ist die Umsetzung der Seismogramme in ein digitales Bildformat, welches Informationen des alpha-Kanals für das Maskieren transparenter Bildbereiche unterstützt und trotzdem unter dem Gesichtspunkt der anzustrebenden Datenreduktion die Seismogramm-Informationen ohne Verluste in der Auflösung abbil-

det. Hierfür und hinsichtlich einer ausgleichenden Darstellung der im Pilottonmodus in inhomogener Form vorliegenden seismischen Einzelspuren ist es zwingend notwendig sich mit Möglichkeiten der digitalen Bildbearbeitung eingehend auseinander zu setzen.

In dem Zusammenhang wäre auch der Einsatz auf Rasterformate basierender, graphischer Filtermethode, welche beispielsweise in *Adobe Photoshop* für die verschiedensten Anwendungszwecke vorgehalten werden, unter dem Gesichtspunkt der nicht verfälschenden Homogenisierung der Bildkomposition von Seismogramm-Abbildungen zu prüfen.

Ein sinnvoller Schritt könnte auch das Konvertieren der im PS3-Format vorliegenden seismischen Daten des Parasound-Sedimentecholotes in das gebräuchliche SEG-Y-Format darstellen, für welches in *Fledermaus* entsprechende Möglichkeiten der gemeinsamen Darstellung in Kombination mit einem digitalen Geländemodells vorgehalten werden (IVS, 2003). Es wäre auch interessant diese Möglichkeit hinsichtlich des entstehenden Datenumfangs für das Einbringen der seismographischen Daten zu untersuchen. Es ist zu vermuten, dass sich die Datenmenge wesentlich reduziert, da nur die Bereiche der Tiefenfenster mit Bildinformationen in *Fledermaus* eingehen sollten.

Des weiteren würden sich in Rahmen des Formatwechsel auch neue Wege für die Nutzung anderer, für die Auswertung von Reflexionsseismik zu Verfügung stehende Programmpackete wie beispielsweise *Disco/Focus* oder *Landmark* erschließen. Dies kann insbesondere bei Gebieten mit mehrfach geschichteten Untergrund von Interesse sein, da beispielsweise in *Landmark* das manuelle Digitalisieren der Schichtreflektoren über zusätzliche Funktionalitäten (wie z.B. *Flatten Seafloor*) vereinfachen läßt.

Literaturverzeichnis

- Atlas. (1989). *Atlas Parasound DS, Operating Instructions*. Krupp Atlas Elektronik.
- Atlas. (1997). *Hydrosweep DS-2, Service Manual, Vol.1*. STN Atlas Electronics.
- Bauer, M. (1997). *Vermessung und Ortung mit Satelliten* (4.Auflage ed.). Heidelberg: Wichmann Verlag.
- Büchschütz-Nothdurft, O. (2002). *Entwicklung eines Ausgleichsalgorithmus zur Verbesserung der Kreuzfächerkalibrierung des Fächerecholotes HYDROSWEEP DS-2*. unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Hannover, Hannover.
- Bergmann, U. (1995). *Interpretation digitaler Parasound Echolotaufzeichnungen im östlichen Arktischen Ozean auf der Grundlage physikalischer Sedimenteigenschaften*. unveröffentlichte Dissertation, Universität Bremen, Fachbereich Geowissenschaften, Bremen.
- Berktaf, H. O. (1965). Possible exploitation of non-linear acoustics in underwater transmitting applications. *J. Sound Vib.*, 2, 435-461.
- BGR. (2003). *Homepage der BGR, Hannover*. URL:<http://sdac.hannover.bgr.de/index2.html> (besucht am 13.12.2003). (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover)
- Calcara, M., & Jokat, W. (2003). Marine Geophysics. In W. Jokat & G. Krause (Eds.), *Die Expedition ANTARKTIS XIX mit FS 'Polarstern' 2001/2002 Bericht von den Fahrtabschnitten 1 und 2* (Vol. 448, p. 36-50). Bremerhaven: Alfred Wegener Institut.
- Caris. (1998). *Caris Hips for Unix - User's Guide*. Universal Systems Ltd.
- Caris. (2002). *Caris Hips 5.2 User's Guide*. Caris Geographic Information Systems BV.
- Christen, S. (1999). *Aufbereitung, Visualisierung und Interpretation einer bathymetrischen Vermessung im Süd Sandwich Tiefseeegraben*. unveröffentlichte Diplomarbeit, Fachhochschule Hamburg, Hamburg.
- Damuth, J., & Hayes, D. (1977). Echo character of the East Brazilian Margin and its relationship to sedimentary processes. *Marine Geology*, 24, 73-95.

- Egge, D. (1998). *NAVSTAR Global Positioning System GPS*. Hamburg: Vorlesungsskript WS 98/99.
- Frahm, A. (2003). *Qualitative Untersuchungen einer ausgeprägten Tiefseerinnenstruktur am ostgrönländischen Kontinentalhang*. unveröffentlichte Diplomarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Hamburg.
- Gauger, S. (2002). *Aufbereitung, Visualisierung und Analyse einer bathymetrischen Vermessung im westlichen Teil des Gakkel-Rückens*. unveröffentlichte Diplomarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Hamburg.
- Hohmann, C. (2002). *Qualitative und Quantitative Untersuchung von Eisbergflugspuren im Bereich der Austaasenbank (Antarktischer Schelf)*. unveröffentlichte Diplomarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Hamburg.
- IVS. (2003). *Reference Manual Version 5.2*. Interactive Visualization Systems.
- Klenke, M. (2002). AWI Bathymetric Chart of the Fram Street (AWI BCFS). In . Bremerhaven: Alfred Wegener Institut for Polar and Marine Research, Bremerhaven.
- Kopsch, C., & Kroth, R. (2003). Geomagnetic Measurements. In W. Jokat & G. Krause (Eds.), *Die Expedition ANTARKTIS XIX mit FS 'Polarstern' 2001/2002 Bericht von den Fahrtabschnitten 1 und 2* (Vol. 448, p. 51-56). Bremerhaven: Alfred Wegener Institut.
- Krocker, R. (2003). Bathymetric investigation in the Weddell Sea. In W. Jokat & G. Krause (Eds.), *Die Expedition ANTARKTIS XIX mit FS 'Polarstern' 2001/2002 Bericht von den Fahrtabschnitten 1 und 2* (Vol. 448, p. 57-58). Bremerhaven: Alfred Wegener Institut.
- Kuhn, G., & Weber, M. (1993). Acoustical characterization of sediments by Parasund and 3.5 kHz systems: Related sedimentary processes on the southeastern Weddell Sea continental slope, Antarctica. *Marine Geology*, 113, 201-217.
- Lurton, X. (2002). *An Introduction To Underwater Acoustics, Principles and Applications*. Chichester UK: Praxis Publishing.
- Medwin, H., & Clay, C. S. (1998). *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. San Diego: Academic Press.
- Müller, C. (2003). (Gespräch geführt am 2.Dezember 2003)
- Muir, T. G. (1974). Nonlinear Acoustics and its Role in the Sedimentary Geophysics of the Sea. In L. L. Hampton (Ed.), *Physics of sound in marine sediments* (p. 241-287). New York: Plenum Press.
- Niemann, S. (2003a). (Gespräch geführt am 17.Dezember 2003)
- Niemann, S. (2003b). Parasound. In W. Jokat & G. Krause (Eds.), *Die Expedition ANTARKTIS XIX mit FS 'Polarstern' 2001/2002 Bericht von den Fahrtabschnitten 1 und 2* (Vol. 448, p. 59-62). Bremerhaven: Alfred Wegener Institut.

- Schenke, H. W. (1990). Die Fächersonaranlage Hydrosweep, Ein neues System zur flächenhaften Vermessung des Meeresbodens. *Die Geowissenschaften*, Nr. 6, 161-169.
- Schenke, H. W. (1992). GPS und Fächersonarmessung mit Hydrosweep auf FS 'Polarstern'. *ZfV*, Heft 8/9, 599-615.
- Schenke, H. W. (1993). Fächersonarmessungen für geowissenschaftliche Untersuchungen. *ZfV*, Heft 4.
- Seibold, E., & Berger, W. H. (1996). *The Sea Floor - An Introduction to Marine Geology* (3rd ed.). Berlin: Springer Verlag.
- Siedler, & Peters. (1982). Properties of sea water. In Landolt & Börnstein (Eds.), *Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik* (p. 233-265). Berlin: Springer.
- Spieß, V. (1993). *Digitale Sedimentechographie - Neue Wege zu einer hochauflösenden Akustostratigraphie*. unveröffentlichte Dissertation, Universität Bremen, Fachbereich Geowissenschaften, Bremen.
- Urban, H. G. (2002). *Handbuch der Wasserschalltechnik* (2. Auflage ed.). Bremen: STN Atlas Elektronik GmbH.
- Urick, R. J. (1983). *Principles of Underwater Sound*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Völker, S. (2002). *Vorlesung ausgewählter Kapitel der Meeresgeologie*. URL:[http://userpage.fu-berlin.de/voelker/Vorlesungline Meeresgeologie/sediment2.html#turbidit](http://userpage.fu-berlin.de/voelker/Vorlesungline%20Meeresgeologie/sediment2.html#turbidit) (besucht am 02.01.2004). (Institut für Geowissenschaften, Freie Universität Berlin, Sommersemester 2002)
- Vogel, H. (1997). *Gerthsen Physik* (19th ed.). Berlin: Springer Verlag.
- Westervelt, P. J. (1963). Parametric acoustic array. *J. Acoust. Soc. Am.*, 35, 535-537.

Danksagung

EUREKA, es ist vollbracht. Nun ist es an der Zeit all denjenigen zu danken, deren Unterstützung mir das Schreiben dieser Seiten ermöglicht haben.

Für die Vergabe, Betreuung und die Möglichkeit einer praktischen Durchführung der Arbeit in dieser Form gilt mein ausdrücklicher Dank

Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Egge &
Herrn Dr.-Ing. H. W. Schenke.

Für die zahlreichen Anregungen, Gespräche und Unterstützung jeglicher Art danke ich Fred, Martin, Alexandra, Sebastian, Andreas³² und den restlichen netten Kollegen aus der Bathymetrie-Arbeitsgruppe am AWI.

Für diverse hilfreiche, programmtechnische Erläuterungen und die freundliche Unterstützung seitens FIELAX bedanke ich mich bei Steffen Gauger, Johannes Rogenhagen und Thomas Schmidt.

Für Hilfestellungen, Literaturanregungen und fahrtspezifische ‘sachdienliche Hinweise’ hinsichtlich des Parasound-Systems danke ich Gerhard Kuhn und Steffen Niemann; sowie Christian Müller für die interessanten Informationen über die Messungen des seismologischen Netzwerkes an der Neumayer Station.

Mein besonderer Dank gilt Regina und Sven für das geduldige Korrekturlesen sowie die großartige Unterstützung in allen Phasen der Bearbeitung und deren Begleitumstände.

Meinen Eltern Elisabeth und Joachim danke ich für ihre motivierende und finanzielle Unterstützung während des gesamten Studiums.

Ein letzter Gruß geht an alle bisher nicht genannten freundlichen Menschen am AWI, auf FS ‘Polarstern’, der Fahrgemeinschaft HB-BHV, meiner wunderbaren WG, an der HAW Hamburg, von OSAE in Bremen und letztlich auch an die außerordentlich hilfsbereiten PostbotInnen.

Irgendwie *k-unicksch*; ich meine noch jemanden wichtiges vergessen zu haben. DANKE!

³²Tja, wer ist da nun gemeint: Beyer oder Winkler? Es dürfen sich beide angesprochen fühlen. Eigentlich hätte ich hier noch weitere Namen aufführen können, aber dafür war hier leider nicht genügend Platz, ebenso wie für die korrekte Nennung der akademischen Titel und Berufsgrade, was hoffentlich auf das wohlwollende Verständnis der hier aufgeführten Personen stößt und in diesem Rahmen vertretbar ist. Außerdem konnte ich so auch noch diese überaus informative Fußnote unterbringen.

A Anhang A Abkürzungen

ADD	Antarctic Digital Database
AML	Arc Macro Language
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AWI	Alfred-Wegener-Institut
BCWS	Bathymetric Chart of the Weddell Sea
CARIS	Computer Aided Resource Information System
CTD	Conductivity - Temperature - Depth
DGM	Digitales Geländemodell
FS	Forschungsschiff
GEBCO	General Bathymetric Chart of the Oceans
GPS	Global Positioning System
GIS	Geographic Information System
HDCS	Hydrographic Data Cleaning System
HIPS	Hydrographic Information Processing System
HYD	Hydrosweep - Format
HYDROSWEEP-DS	Hydrographic Multibeam Sweeping Survey Echosounder - Deep Sea
IDW	Inverse Distance Weighting
IHO	International Hydrographic Organization
INMARSAT	International Maritime Satellite
NACOS	Integrated Navigation and Command System
MINS	Marine Internal Navigation System
ParaDigMa	Parasound Digitalisierungs- und Mehrkanal-Auswertesystem
PARASOUND	Parametric Sediment Survey Echosounder
PFB	PreFormed Beam
PODAS	Polarstern-Datenmanagement-System
ODV	Ocean Data View
SCAR	Scientific Committee on Antarctic Research
SCUFN	Sub-Committee on Undersea Feature Names
SONAR	Sound navigation and ranging
SURF	Sensor-Unabhängiges-Rohdaten-Format
SVP	Sound Velocity Profile
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation
WVS	World Vector Shoreline

B Anhang B: Wasserschallformel nach Chen-Millero

Aus dem mit CTD-Messungen bestimmten physikalischen Parametern Salzgehalt (S), Temperatur (T) und Druck (P) lassen sich Profilverläufe der Wasserschallgeschwindigkeit in der Wassersäule berechnen. Dazu werden in der Fachliteratur die verschiedensten Formeln angegeben. Eine der meistverwendeten ist die von der UNESCO empfohlene Formel nach Chen & Millero, welche auch im ozeanographischen Modellierungsprogramm ODV für die Berechnung der Wasserschallgeschwindigkeit ihre Anwendung findet.

Die Wasserschallgeschwindigkeit V berechnet sich wie folgt:

$$V = C + A \cdot S + B \cdot S^{\frac{3}{2}} + D \cdot S^2 \quad (\text{B.1})$$

S steht in dieser Gleichung für den Salzgehalt. A, B, C und D ergeben sich aus den im Folgenden aufgeführten Terme:

$$\begin{aligned} A = & A_{00} + A_{01}T + A_{02}T^2 + A_{03}T^3 + A_{04}T^4 \\ & + (A_{10} + A_{11}T + A_{12}T^2 + A_{13}T^3 + A_{14}T^4) \cdot P \\ & + (A_{20} + A_{21}T + A_{22}T^2 + A_{23}T^3) \cdot P^2 \\ & + (A_{30} + A_{31}T + A_{32}T^2) \cdot P^3 \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

$$B = B_{00} + B_{01}T + (B_{10} + B_{11}T) \cdot P \quad (\text{B.3})$$

$$\begin{aligned} C = & C_{00} + C_{01}T + C_{02}T^2 + C_{03}T^3 + C_{04}T^4 + C_{05}T^5 \\ & + (C_{10} + C_{11}T + C_{12}T^2 + C_{13}T^3 + C_{14}T^4) \cdot P \\ & + (C_{20} + C_{21}T + C_{22}T^2 + C_{23}T^3 + C_{24}T^4) \cdot P^2 \\ & + (C_{30} + C_{31}T + C_{32}T^2) \cdot P^3 \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

$$D_{00} + D_{10}P \quad (\text{B.5})$$

T steht hier für die Temperatur und P für den Druck. Die physikalischen Zustandsgrößen gehen dabei mit folgenden Einheiten in die Berechnungen ein:

Druck	P	dbar
Temperatur	T	°C (IPITS-68 Skala)
Salinität	S	psu (Practical Salinity Units PSS-78-Skala)

In den Termen für A, B, C und D haben die Koeffizienten folgende Werte:

Index[ij]	A_{ij}	B_{ij}	C_{ij}	D_{ij}
00	1.389	$-1.922 \cdot 10^{-2}$	1402.388	$1.727 \cdot 10^{-3}$
01	$-1.262 \cdot 10^{-2}$	$-4.42 \cdot 10^{-5}$	5.03711	

02	$-7.164 \cdot 10^{-5}$		$-5.80852 \cdot 10^{-2}$	
03	$2.006 \cdot 10^{-6}$		$3.342 \cdot 10^{-4}$	
04	$-3.21 \cdot 10^{-8}$		$-1.478 \cdot 10^{-6}$	
05			$3.1464 \cdot 10^{-9}$	
10	$9.4742 \cdot 10^{-5}$	$7.3637 \cdot 10^{-5}$	0.153563	$-7.9836 \cdot 10^{-6}$
11	$-1.2580 \cdot 10^{-5}$	$1.7945 \cdot 10^{-7}$	$6.8982 \cdot 10^{-4}$	
12	$-6.4885 \cdot 10^{-8}$		$-8.1788 \cdot 10^{-6}$	
13	$1.0507 \cdot 10^{-8}$		$1.3621 \cdot 10^{-7}$	
14	$-2.0122 \cdot 10^{-10}$		$-6.1185 \cdot 10^{-10}$	
20	$-3.9064 \cdot 10^{-7}$		$3.126 \cdot 10^{-5}$	
21	$9.1041 \cdot 10^{-9}$		$-1.7107 \cdot 10^{-6}$	
22	$-1.6002 \cdot 10^{-10}$		$2.5974 \cdot 10^{-8}$	
23	$7.988 \cdot 10^{-12}$		$-2.5335 \cdot 10^{-10}$	
24			$1.0405 \cdot 10^{-12}$	
30	$1.1 \cdot 10^{-10}$		$-9.7729 \cdot 10^{-9}$	
31	$6.649 \cdot 10^{-12}$		$3.8504 \cdot 10^{-10}$	
32	$-3.389 \cdot 10^{-13}$		$-2.3643 \cdot 10^{-12}$	

Gegenüber der in 2.2 aufgeführte stark vereinfachte Gleichung 2.5 von Medwin (1975) besitzt diese eine wesentlich stärker differenzierte Struktur.

C Quelltext der AML-Scripte zur Kartenerstellung in ArcInfo

C.1 AML-Quelltext zur Karte

```
1 /* -----
2 /* %~~~~~Start-Skript fuer Karte~~~~~%
3 /* -----
4
5 /* *****
6 /*  Ausgabe Grafik File .eps
7 /* *****
8
9 hardcopy postscript /bats3/user6/aiffland/plots/karte_abgabe3.eps
10
11 /* *****
12 /*  Setzen der Variablen und Parameter
13 /* *****
14
15 &setvar .mapprjin = /bats3/user6/aiffland/diplom/prj/merc.prj
16 &setvar .mapprjout = /bats3/user6/aiffland/diplom/prj/merc_ges.prj
17 &setvar .mapprjgeo = /bats3/user6/aiffland/diplom/prj/geo.prj
18 &setvar .mapprjgeodm = /bats3/user6/aiffland/diplom/prj/geo_dm.prj
19 &setvar .mapprjgeods = /bats3/user6/aiffland/diplom/prj/geo_ds.prj
20
21 &setvar .mapextll = 0.00 -70.16666667 4.00 -68.83333333
22 &setvar .mapextlldm = 0.00 -4210.0001 240.00 -4129.99994
23 &setvar .mapextlldmr = -0.00001 -4210.0001 240.00001 -4129.99994
24 &setvar .mapextxy = -78199.8002 -3892774.3358 78199.8002 -3743982.0319
25
26 weeddraw off /*keine Vereinfachung der arcs und polys
27 clipmapextent off /*Kartengrenze ungleich Zeichengrenze
28
29 pageunits cm
30 pagesize 120 84.1
31
32 /* *****
33 /*  Hauptkarte
34 /* *****
35
36 mapprojection %.mapprjin% %.mapprjout%
```

```
37 mapextent %.mapextxy%
38 mapunits meters
39 maplimits 36 1 104 82
40 mapscale 250000
41
42 mapposition LL 37.00 5.65 /*neue Rahmenbreite
43
44 units page
45
46 /* *****
47 /* Linien- und Textsymbole setzen
48 /* *****
49
50 lineset color.lin; linesymbol 1; linecolor blue
51 textset font.txt; textsymbol 18; textstyle typeset
52 textcolor blue; textsize 0.2
53
54 /* *****
55 /* Tiefenstufenpolygone, Isolinien und Beschriftung
56 /* *****
57
58 &run plot-isolines.aml
59 &type '...jetzt geht's im Hauptsript weiter!'
60
61 /* *****
62 /* Kartenrahmen
63 /* *****
64
65 linesymbol 1; linecolor black; linesize 0.02
66 &type '...Linienfarbe gesetzt!'
67 neatline %.mapextlldmr% %.mapprjgeodm% clear maplimits
68 lineoffset 0.22 0.22
69 neatline %.mapextlldmr% %.mapprjgeodm% clear maplimits
70 lineoffset 0 0
71
72 &type '...Neatlines gesetzt!'
73
74 /* *****
75 /* Gridlinien
76 /* *****
77
78 linecolor black; linesymbol 1; linesize 0.02
79 neatlinegrid 30 10 %.mapprjgeodm%
80
81 &type '...Neatlinegrid erzeugt!'
82
83 /* *****
84 /* Beschriftungsmarken
```

```
85 /* *****
86
87 neatlinehatch 60 5 0.2 0.1 %.mapprjgeodm% /* beschriftete grosse N/S
88 neatlinehatch 10 5 0.12 0.07 %.mapprjgeodm% /* beschriftete kleine N/S
89 neatlinehatch 2 5 0.08 0.15 %.mapprjgeodm% /* unbeschriftete Seiten
90
91 neatlinehatch 60 5 0.22 0.13 %.mapprjgeodm% /* beschriftete grosse Seiten
92 neatlinehatch 60 1 0.12 0.07 %.mapprjgeodm% /* beschriftete kleine Seiten
93 neatlinehatch 3600 20 0.08 0.15 %.mapprjgeods% /* unbeschriftete Seiten
94
95 &type '...Neatlinehatch erzeugt!'
96
97 /* *****
98 /* Neatlinelabels bottom
99 /* *****
100
101 textcolor 1; textjustification UC; textsize 0.4; textoffset 0.1 -0.3
102 &type '...textcolor -und justification abgeschlossen!'
103 neatlinelabels 0.5 bottom all %.mapprjgeo% DMS '%1%!pat1857;
    %2%!pat1727; E'
104 &type '...erste Zeile Neatlinelabels fertig!'
105 textsize 0.3; textoffset -0.2 -0.2
106 &type '...textoffset gesetzt!'
107 neatlinelabels 0.166666666666666666 bottom 2 3 5 6 8 9 11 12 14 15 17 18 20
    21 23 24 %.mapprjgeo% DMS '%2%!pat1727;'
108
109 &type '...Neatlinelabels unten erzeugt!'
110
111 /* *****
112 /* Neatlinelabels top
113 /* *****
114
115 textjustification LC;textsize 0.4; textoffset 0.1 0.4
116 neatlinelabels 0.5 top all %.mapprjgeo% DMS '%1%!pat1857; %2%!pat1727;E'
117 textsize 0.3; textoffset -0.15 0.3
118 neatlinelabels 0.166666666666666666 top 2 3 5 6 8 9 11 12 14 15 17 18 20 21
    23 24 %.mapprjgeo% DMS '%2%!pat1727;'
119
120 &type '...Neatlinelabels oben erzeugt!'
121
122 /* *****
123 /* Neatlinelabels right
124 /* *****
125
126 textjustification CL; textsize 0.4; textoffset 0.4 0.05
127 neatlinelabels 0.166666666666666666 right all %.mapprjgeo% DMS '%1%!pat1857;
    %2%!pat1727; S'
128 textsize 0.3; textoffset -0.1 0.05
```

```
129 neatlinelabels 0.01666666666 right 4 8 14 18 24 28 34 38 44 48 54 58 64
    68 74 78 %.mapprjgeo% DMS '%2%!pat1727;\'
130
131 &type \'...Neatlinelabels rechts erzeugt!\'
132
133 /* *****
134 /* Neatlinelabels left
135 /* *****
136
137 textjustification CR; textsize 0.4; textoffset -0.4 0.05
138 neatlinelabels 0.16666666666 left all %.mapprjgeo% DMS '%1%!pat1857;
    %2%!pat1727; S\'
139 textsize 0.3; textoffset -0.3 0.05
140 neatlinelabels 0.01666666666 left 4 8 14 18 24 28 34 38 44 48 54 58 64
    68 74 78 %.mapprjgeo% DMS '%2%!pat1727;\'
141
142 &type \'...Neatlinelabels links erzeugt!\'
143
144 textoffset 0 0
145
146 neatline -900.00001 4420.0 -719.99999 4470.00001 %.mapprjgeodm%
147
148 /* *****
149 /* Sheet Index Karte
150 /* *****
151
152 &setvar .x = 11
153 &setvar .y = 1.5
154
155 &run plot-index.aml
156
157 /* *****
158 /* Tracklinien Karte
159 /* *****
160
161 &setvar .x = 11
162 &setvar .y = 19
163
164 &run plot-track.aml
165
166 /* *****
167 /* AWI Logo
168 /* *****
169
170 EPS /bats3/user6/aiffland/diplom/awi_txt_engl_helvetica.eps BOX 11.5
    69 33.5 74
171
172 /* *****
```

```
173 /* Legende
174 /* *****
175
176 &setvar .x = 11
177 &setvar .y = 52.5
178
179 &run plot-legende.aml
180
181 /* *****
182 /* Data Sources and References
183 /* *****
184
185 &setvar .x = 12.5
186 &setvar .y = 37
187
188 &run plot-source.aml
189
190 /* *****
191 /* Kartenbeschriftung
192 /* *****
193 textoffset 0 0
194 textcolor black; textsize 1.0
195 move 68 69.5; text 'Canyon System Bathymetry off Fimbulisen, 1:250000'
    LC
196
197 textsize 0.5
198 move 68 1.5; text 'NOT TO BE USED FOR NAVIGATION' LC
199
200 /* *****
201 /* Rechteckrahmen
202 /* *****
203
204 linesymbol 1; linesize 0.02; linecolor black
205 box 9.8 0.5 104.5 74.5 /*Kartenrahmen
206
207 linesize 0.02; lineoffset 0.00
208 box 34 2.5 102.5 68.5 /*Rahmen Hauptkarte
209
210 linesize 0.1; lineoffset -0.15
211 box 34 2.5 102.5 68.5 /*Rahmen Hauptkarte
212
213 linesize 0.02; lineoffset -0.3
214 box 34 2.5 102.5 68.5 /*Rahmen Hauptkarte
215
216 lineoffset 0
217
218 box 12 19 33 36 /*Rahmen Track Lines
219 box 12 52.5 33 68.5 /*Rahmen Legende
```

```
220 box 12 37 33 51.5 /*Rahmen Data Source
221 box 12 2.5 33 18 /*Rahmen Sheet Index
222
223 /* *****
224 /* Beschriftungen in der Karte
225 /* *****
226
227 /* -----
228 /* fuer grosse Karte
229 /* -----
230
231 textcolor black
232 textoffset 41.5 3.5
233 textsize 1
234 textdirection horizontal
235 move 4.3 5.2
236 text 'FIMBULISEN' LL
237
238 /* -----
239 /* fuer Trackplot
240 /* -----
241
242 textoffset 10.2 16.5
243 textsize 0.3
244 textdirection horizontal
245 move 4.3 5.2
246 text 'FIMBULISEN' LL
247
248 textoffset 10.2 16.5
249 textsize 0.3
250 textdirection horizontal
251 /*move 5.0 5.2
252 /*text 'FIMBUL' LC
253 /*move 5.0 4.9
254 /*text 'ICE SHELF' LC
255
256 /* -----
257 /* fuer grosse Karte
258 /* -----
259
260 textsymbol 4 /* für die kursive Schrift
261 textcolor blue
262 textoffset 88.0 42
263 textsize 1.5
264 textdirection horizontal
265 move 7.5 5.2
266 text 'LAZAREV' LC
267 move 7.5 4.0
```

```
268 text 'SEA' LC
269
270 /* -----
271 /* fuer Trackplot
272 /* -----
273
274 textcolor black
275 textoffset 20.5 24.8
276 textsize 0.3
277 textdirection horizontal
278 move 4.0 5.2
279 text 'LAZAREV' LC
280 move 4.0 4.9
281 text 'SEA' LC
282
283 /* *****
284 /*Beschriftung der Canyon
285 /* *****
286
287 textsymbol 15 /* für kursive Schrift
288 textcolor blue
289 textoffset 0 0
290 textsize 0.45
291 textdirection horizontal
292
293 move 41.6 42
294 textangle 292 0
295 text 'B A E Y E R   C A N Y O N'
296
297 textsymbol 15
298 textcolor blue
299 textoffset 0 0
300 textsize 0.45
301 textdirection horizontal
302
303 move 54.0 35.4
304 textangle 302 0
305 text 'F I M B U L   C A N Y O N'
306
307 textoffset 0 0
308 textangle 0 0
309
310 hardcopy end
311
312 &return
```

C.2 AML-Quelltext zur Darstellung des Inhaltes der Hauptkarte

```
1 /* -----
2 /* %AML-SubScript zur Isoliniendarstellung der Hauptkarte%
3 /* -----
4
5 /* *****
6 /* Setzen der Variablen und Parameter
7 /* *****
8
9 &setvar contour_cov = DIPLOM_ISOL2
10 &setvar polygon_cov = DIPLOM_POLYS2
11 &setvar contour_gebco = GEB_ALL4_200M
12 &setvar coastline = MAR_COASTL_M
13 &setvar iceshelf_poly = MAR_ICETYP_M
14
15 /* *****
16 /* Aufrufen der Subroutinen
17 /* *****
18
19 &call iso-gebco      /* Isolinien GEBCO
20 &call ice_shelf     /* Ice Shelf, Einfärbung der Polygone
21 &call coastline     /* Antarktische Küstenlinien (Schelf Ice/Grounded
    Ice)
22 &call polygons     /* Tiefenstufenpolygone
23 &call isolines     /* Isolinien
24 /*&call trackline /* Tracklinie von ANT XIX-2
25 /*&call text      /* Beschriftung in der Karte
26 /*call trackiso   /* Isolinien für Trackplot
27 &return
28
29 /* *****
30 /* Isolinien GEBCO und Beschriftung
31 /* *****
32
33 &routine iso-gebco
34 mapunits meters
35 linesymbol 1
36 linecolor rgb 175 175 175; textcolor rgb 175 175 175
37
38 /* isolinien unbeschriftet 0.01 100m ohne laengenbegrenzung -----
39 linesize 0.01
40 unselect %contour_gebco% arcs
41 &do int = 0 &to 6000 &by 100
42     aselect %contour_gebco% arcs depth eq %int% /*AND length gt 100
43 &end
44 &do int = 0 &to 6000 &by 500
```

```

45   unselect %contour_gebco% arcs depth eq %int%
46   &end
47   arcs %contour_gebco%
48   unselect %contour_gebco% arcs
49
50 /* isolinien unbeschriftet 0.02 500m kuerzer 2000m -----
51 linesize 0.02
52   &do int = 0 &to 6000 &by 500
53     aselect %contour_gebco% arcs depth eq %int% AND length le 2000 AND
54     length gt 100
55   &end
56   arcs %contour_gebco%
57   unselect %contour_gebco% arcs
58 /* isolinien beschriftet 0.02 500m laenger 2000m -----
59   &do int = 0 &to 6000 &by 500
60     aselect %contour_gebco% arcs depth eq %int% AND length gt 2000
61   &end
62   arctext %contour_gebco% depth # line # blank
63   unselect %contour_gebco% arcs
64 linesize 0.02
65
66 &return
67
68 /* *****
69 /* Ice Shelf und Grounded Ice Polygone
70 /* *****
71
72 &routine ice_shelf
73
74 &type ' ...hier werden Ice Shelf Farben festgelegt...!'
75
76 shadetype color
77 &type ' ...Shadetype color festgelegt!'
78
79 shadecolor rgb 230 230 230
80   unselect %iceshelf_poly% polys
81   aselect %iceshelf_poly% polys ICE_TYPE eq 'Ice shelf'
82   polygonshades %iceshelf_poly% 1000
83   unselect %iceshelf_poly% polys
84   &type '....Ice Shelf fertig!'
85
86 shadecolor rgb 190 190 190
87   aselect %iceshelf_poly% polys ICE_TYPE eq 'Groundet ice'
88   polygonshades %iceshelf_poly% 1000
89   unselect %iceshelf_poly% polys
90   &type '....Grounded Ice fertig!'
91

```

```
92 &return
93
94 /* *****
95 /*Antarktische Kuestenlinien
96 /* *****
97
98 &routine coastline
99 &type '...Antarktis Kuestenlinien beginnt!'
100 linesymbol 1
101 linecolor rgb 90 90 90;
102
103 /* ADD-Linien aus GEBCO zeichnen lassen -----
104 linesize 0.01
105 unselect %coastline% arcs
106 aselect %coastline% arcs COASTLINE_ eq 22010
107 aselect %coastline% arcs COASTLINE_ eq 22012
108 aselect %coastline% arcs COASTLINE_ eq 22013
109 aselect %coastline% arcs COASTLINE_ eq 22022
110 aselect %coastline% arcs COASTLINE_ eq 22050
111 arcs %coastline%
112 unselect %coastline% arcs
113
114 &type '...Antarktis Kuestenlinien sind fertig!'
115
116 &return
117
118 /* *****
119 /* Tiefenstufenpolygone laden
120 /* *****
121
122 &routine polygons
123 &type '....hier werden Farben festgelegt...!'
124
125 shadetype color
126 &type '....Shadetype color festgelegt!'
127
128 shadecolor cmyk 3 0 15 0 /*gelblich (dunkel)
129 unselect %polygon_cov% polys
130 aselect %polygon_cov% polys diplom_polys2-id eq 111
131 aselect %polygon_cov% polys diplom_polys2-id eq 113
132 aselect %polygon_cov% polys diplom_polys2-id eq 138
133 aselect %polygon_cov% polys diplom_polys2-id eq 143
134 aselect %polygon_cov% polys diplom_polys2-id eq 144
135 aselect %polygon_cov% polys diplom_polys2-id eq 164
136 aselect %polygon_cov% polys diplom_polys2-id eq 901
137 aselect %polygon_cov% polys diplom_polys2-id eq 902
138 aselect %polygon_cov% polys diplom_polys2-id eq 903
139 aselect %polygon_cov% polys diplom_polys2-id eq 904
```

```
140   polygonshades %polygon_cov% 1000
141   unselect %polygon_cov% polys
142   &type '....Not Surveyed Area fertig!'
143
144
145   shadecolor cmyk 9 3 0 0
146   unselect %polygon_cov% polys
147   aselect %polygon_cov% polys tiefenstufe eq 1
148   polygonshades %polygon_cov% 1000
149   unselect %polygon_cov% polys
150   &type '....Tiefenstufe 1 fertig!'
151
152
153   shadecolor cmyk 16 4 0 0
154   aselect %polygon_cov% polys tiefenstufe eq 2
155   polygonshades %polygon_cov% 1000
156   unselect %polygon_cov% polys
157   &type '....Tiefenstufe 2 fertig!'
158
159   shadecolor cmyk 22 7 0 0
160   aselect %polygon_cov% polys tiefenstufe eq 3
161   polygonshades %polygon_cov% 1000
162   unselect %polygon_cov% polys
163   &type '....Tiefenstufe 3 fertig!'
164
165   shadecolor cmyk 28 9 0 0
166   aselect %polygon_cov% polys tiefenstufe eq 4
167   polygonshades %polygon_cov% 1000
168   unselect %polygon_cov% polys
169   &type '....Tiefenstufe 4 fertig!'
170
171   shadecolor cmyk 35 11 0 0
172   aselect %polygon_cov% polys tiefenstufe eq 5
173   polygonshades %polygon_cov% 1000
174   unselect %polygon_cov% polys
175   &type '....Tiefenstufe 5 fertig!'
176
177   shadecolor cmyk 42 15 0 0
178   aselect %polygon_cov% polys tiefenstufe eq 6
179   polygonshades %polygon_cov% 1000
180   unselect %polygon_cov% polys
181   &type '....Tiefenstufe 6 fertig!'
182
183   shadecolor cmyk 50 19 0 0
184   aselect %polygon_cov% polys tiefenstufe eq 7
185   polygonshades %polygon_cov% 1000
186   unselect %polygon_cov% polys
187   &type '....Tiefenstufe 7 fertig!'
```

```
188
189 shadecolor cmyk 55 23 0 0
190   aselect %polygon_cov% polys tiefenstufe eq 8
191   polygonshades %polygon_cov% 1000
192   unselect %polygon_cov% polys
193   &type '....Tiefenstufe 8 fertig!'
194
195 shadecolor cmyk 62 27 0 0
196   aselect %polygon_cov% polys tiefenstufe eq 9
197   polygonshades %polygon_cov% 1000
198   unselect %polygon_cov% polys
199   &type '....Tiefenstufe 9 fertig!'
200   &type '....jetzt weiter mit den Isolinien !'
201
202 &return
203
204
205 /* *****
206 /* Isolinien und Beschriftung
207 /* *****
208
209 &routine isolines
210
211 /* isolinien unbeschriftet 0.005 50m ohne laengenbegrenzung -----
212 linesymbol 1
213 linesize 0.005
214 linecolor 4
215 textcolor 4
216 linesize 0.005
217 unselect %contour_cov% arcs
218   &do int = 0 &to -6000 &by -250
219     unselect %contour_cov% arcs depth eq %int% AND length le 2000 AND
220     length gt 100
221   &end
222   &do int = 0 &to -6000 &by -250
223     unselect %contour_cov% arcs depth eq %int% AND length gt 2000
224     &end
225     arcs %contour_cov%
226     unselect %contour_cov% arcs
227   &type '....unbeschriftete Isolinien sind fertig!'
228
229
230 /* isolinien unbeschriftet 0.02 250m kuerzer 2000m -----
231 linesize 0.02
232 linecolor 4
233 textcolor 4
234 linesize 0.02
235   &do int = 0 &to -6000 &by -250
```

```

236 aselect %contour_cov% arcs depth eq %int% AND length le 2000 AND length
    gt 100
237   &end
238   unselect %contour_cov% arcs diplom_isol2-id eq 1364
239   arcs %contour_cov%
240   unselect %contour_cov% arcs
241   &type '...unbeschriftete Isolinien kuerzer als 2000m sind fertig!'
242
243 /* isolinien beschriftet 0.02 250m laenger 2000m -----
244   &do int = 0 &to -6000 &by -250
245     aselect %contour_cov% arcs depth eq %int% AND length gt 2000
246     &end
247     aselect %contour_cov% arcs diplom_isol2-id eq 1364
248     arctext %contour_cov% wahre_tiefe # line # blank
249     unselect %contour_cov% arcs
250     &type '...beschriftete Isolinien sind fertig und es geht weiter!'
251 &return
252
253 /* *****
254 /*  Tracklinie
255 /* *****
256
257 &routine trackline
258
259 lineset color.lin
260
261 linecolor 2
262 linesize 0.04
263 aselect track_ant19_2 arcs
264 arcs track_ant19_2
265 unselect track_ant19_2 arcs
266
267 &return
268
269 /* *****
270 /*  alle 100m Isolinie für Tracklinie
271 /* *****
272
273 &routine trackiso
274
275 /* isolinien unbeschriftet 0.005 100m ohne laengenbegrenzung -----
276 linesymbol 1
277 linesize 0.005
278 linecolor 4
279 textcolor 4
280 linesize 0.005
281 unselect %contour_cov% arcs
282   &do int = 0 &to -6000 &by -100

```

```
283  &end
284    arcs %contour_cov%
285    unselect %contour_cov% arcs
286    &type '...unbeschriftete Isolinien sind fertig!'
287
288 &return
289
290 /* *****
291 /* Beschriftungen in der Karte
292 /* *****
293 /*steht alles in plot-start.aml am Ende !!!
294
295 &routine text
296
297 textcolor black
298 textoffset 41.5 3.5
299 textsize 1
300 textdirection horizontal
301 move 4.3 5.2
302 text 'FIMBULISEN' LL
303
304 textsymbol 4 /* für die Kursive Schrift
305 textcolor blue
306 textoffset 83 47
307 textsize 1
308 textdirection horizontal
309 move 4.3 5.2
310 text 'LAZAREV' LL
311 move 6.5 4.2
312 text 'SEA' LL
313
314 textoffset 0 0
315 textangle 0 0
316
317 &return
```

C.3 AML-Quelltext zur Nebenkarte

Sheet Index

```
1 /* -----
2 /* %~~~~~AML-SubScript: Sheet Index~~~~~%
3 /* -----
4
5 /* *****
6 /* Setzen der Variablen und Parameter
7 /* *****
8
9 &setvar mapprjindex = /bats3/user6/aiffland/diplom/prj/ps2.prj
10 &setvar mapextindy = -408266.6483 -1688084.4878 1054832.2598
    -1287316.90
11 &setvar mapextindll = -180.00 -90.00 180.00 -50.00
12
13 mapposition LL 17.1 8.0
14
15 /* *****
16 /* Beschriftung
17 /* *****
18
19 textcolor black; textsize 0.8
20   move [calc %.x% + 11] [calc %.y% + 15]
21   text 'Chart Index' LC
22
23 textsize 0.3
24   move [calc %.x% + 1.5] [calc %.y% + 1.5]
25   text 'Polar Stereographic Projection' LL
26   move [calc %.x% + 21.5] [calc %.y% + 1.5]
27   text "Not Scaled" LR
28 &type '....Antarktis-Index wird geladen'
29
30 /* *****
31 /* Antarktis Bild einfuegen
32 /* *****
33
34 EPS /bats3/user6/aiffland/plots/ant_index/index_50mio_gv.eps BOX
    [calc %.x% + 2.7] [calc %.y% - 4.5] [calc %.x% + 20.7]
    [calc %.y% + 13.5]
35
36 &type ' ...Plot-Index ist fertig'
37
38 &return
```

C.4 AML-Quelltext zur Nebenkarte Track Lines

```
1 /* -----
2 /* %~~~~~AML-SubScript: Track Lines~~~~~%
3 /* -----
4
5 &setvar coastline = MAR_COASTL_M
6 &setvar iceshelf_poly = MAR_ICETYP_M
7 &setvar contour_cov = DIPLOM_ISOL2
8
9 maplimits 11 21 28.5 33
10 mapunits meters
11 mapscale 1250000
12 mapposition LL 13.5 21
13
14 /* *****
15 /* Beschriftung
16 /* *****
17
18 textcolor 1; textsize 0.8
19   move [calc %.x% + 11] [calc %.y% + 15.4]
20   text 'RV "Polarstern" Track Lines' LC
21 textsize 0.55
22   move [calc %.x% + 19.2] [calc %.y% + 13.5]
23   text 'Cruises' LC
24 textsize 0.4
25   move [calc %.x% + 19.0] [calc %.y% + 12.0]
26   text 'ANT IX/3' CL
27   move [calc %.x% + 19.0] [calc %.y% + 11.0]
28   text 'ANT X/2' CL
29   move [calc %.x% + 19.0] [calc %.y% + 10.0]
30   text 'ANT XIX/2' CL
31
32 lineset color.lin
33 linesymbol 1
34
35 linecolor black
36 linesize 0.02
37 line [calc %.x% + 17.5] [calc %.y% + 13] [calc %.x% + 21]
   [calc %.y% + 13]
38
39 linecolor 2
40 linesize 0.04
41 line [calc %.x% + 17.5] [calc %.y% + 12] [calc %.x% + 18.5]
   [calc %.y% + 12]
42
43 linecolor 3
```

```
44 linesize 0.04
45 line [calc %.x% + 17.5] [calc %.y% + 11] [calc %.x% + 18.5]
    [calc %.y% + 11]
46
47 linecolor 4
48 linesize 0.04
49 line [calc %.x% + 17.5] [calc %.y% + 10] [calc %.x% + 18.5]
    [calc %.y% + 10]
50
51 textsize 0.3
52   move [calc %.x% + 1.5] [calc %.y% + 0.5]
53     text 'Mercator Projection' LL
54   move [calc %.x% + 21.5] [calc %.y% + 0.5]
55     text "Scale 1 : 1 250 000 at 69°30' S " LR
56
57 mapprojection /bats3/user6/aiffland/diplom/prj/merc.prj
    /bats3/user6/aiffland/diplom/prj/merc.prj
58 mapextent %.mapextxy%
59
60
61 /* *****
62 /* Polygonshades erzeugen
63 /* *****
64
65 /* -----
66 /* Ice Shelf und Grounded Ice Polygone
67 /* -----
68
69
70
71 &type '...hier werden Ice Shelf Farben festgelegt...!'
72
73 shadetype color
74 &type '...Shadetype color festgelegt!'
75
76 shadecolor rgb 230 230 230
77   unselect %iceshelf_poly% polys
78   aselect %iceshelf_poly% polys ICE_TYPE eq 'Ice shelf'
79   polygonshades %iceshelf_poly% 1000
80   unselect %iceshelf_poly% polys
81   &type ' ...Ice Shelf fertig!'
82
83 shadecolor rgb 190 190 190
84   aselect %iceshelf_poly% polys ICE_TYPE eq 'Groundet ice'
85   polygonshades %iceshelf_poly% 1000
86   unselect %iceshelf_poly% polys
87   &type ' ...Grounded Ice fertig!'
88
```

```
89 /* -----
90 /*  ADD Coastline MAR_COAST_M
91 /* -----
92
93 &type '...Antarktis Kuestenlinien beginnt!'
94 linesymbol 1
95 linecolor rgb 130 130 130;
96
97 /* ADD-Linien aus GEBCO zeichnen lassen -----
98 linesize 0.01
99  unselect %coastline% arcs
100  aselect  %coastline% arcs COASTLINE_ eq 22010
101    aselect  %coastline% arcs COASTLINE_ eq 22012
102    aselect  %coastline% arcs COASTLINE_ eq 22013
103    aselect  %coastline% arcs COASTLINE_ eq 22022
104    aselect  %coastline% arcs COASTLINE_ eq 22050
105  arcs %coastline%
106  unselect %coastline% arcs
107
108 &type '...Antarktis Kuestenlinien sind fertig!'
109
110
111 /* *****
112 /*  Tracklinien
113 /* *****
114 lineset color.lin
115
116 linecolor 4
117 linesize 0.04
118 aselect track_ant19_2 arcs
119 arcs track_ant19_2
120 unselect track_ant19_2 arcs
121
122 linecolor 2
123 linesize 0.04
124 aselect track_ant9_3 arcs
125 arcs track_ant9_3
126 unselect track_ant9_3 arcs
127
128 linecolor 3
129 linesize 0.04
130 aselect track_ant10_2 arcs
131 arcs track_ant10_2
132 unselect track_ant10_2 arcs
133
134 /* -----
135 /*  Kartenrahmen
136 /* -----
```

```
137
138 linecolor 1; linesize 0.02
139 neatline %.mapextl1% %.mapprjgeo% clear maplimits
140 linesymbol 1; linesize 0.005
141 neatlinegrid 1 0.3333333333 %.mapprjgeo%
142
143 textcolor 1; textsize 0.2; textjustification UC; textoffset 0 -0.3
144 neatlinelabels 1 bottom all %.mapprjgeo% DMS '%1%!pat1857;
    %2%!pat1727; E';
145
146 textcolor 1; textsize 0.2; textjustification LC; textoffset 0 0.3
147 neatlinelabels 1 top all %.mapprjgeo% DMS '%1%!pat1857;
    %2%!pat1727; E';
148
149 textcolor 1; textsize 0.2; textjustification CR; textoffset -0.4 0
150 neatlinelabels 0.1666666666666666 left 1 2 4 6 8 9 %.mapprjgeo% DMS
    '%1%!pat1857; %2%!pat1727; S';
151
152 textcolor 1; textsize 0.2; textjustification CL; textoffset 0.4 0
153 neatlinelabels 0.1666666666666666 right 1 2 4 6 8 9 %.mapprjgeo%
    DMS '%1%!pat1857; %2%!pat1727; S';
154
155 textoffset 0 0
156
157 &return
```

C.5 AML-Quelltext zum Kartenbegleittext

```
1 /* -----
2 /* %~~~AML-SubScript: Data Sources and References~~~%
3 /* -----
4
5 textcolor black; textsize 0.8
6   move [calc %.x% + 10] [calc %.y% + 13]
7     text 'Data Sources and References' LC
8
9 /* --- Data sources -----
10
11 textsymbol 20; textstyle typeset; textsize 0.3
12   move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 12]
13     text 'Data sources' LL
14 &type 'data sources'
15 textsymbol 18; textsize 0.3; textstyle typeset
16   move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 11.6]
17     text 'High resolution bathymetry by RV "Polarstern" Multibeam
18         surveys (Hydrosweep DS-1 and 2): ' LL
19   move [calc %.x% + 1.7] [calc %.y% + 11.2]
20     text 'ANT IX 3, ANT X 2, ANT XIX 2' LL
21   move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 10.8]
22     text 'Background bathymetry: General Bathymetric Chart Of The Oceans
23         (GEBCO), Centenary Edition Version 1.0 (2003)' LL
24   move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 10.4]
25     text 'Antarctic Shorelines : Antarctic Digital Database (ADD) by the
26         Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR), Version 3.0
27         (2000)' LL
28   move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 10.0]/*dazu gekommen
29     text 'Feature Names : Composite Gazetteer of Antarctica by the
30         Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR), (March 1998)' LL
31
32 /* --- Data capture -----
33
34 textsymbol 20; textstyle typeset; textsize 0.3
35   move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 9.2]/*9.6
36     text 'Data capture' LL
37 &type 'Data capture'
38 textsymbol 18; textsize 0.3; textstyle typeset
39   move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 8.8]/*9.2
40     text 'H. Hinze, I. Musch, J. Dreyer (ANT IX 3), T. Schöne, S. Koch,
41         B. Müschen (ANT X 2) ' LL
42   move [calc %.x% + 1.7] [calc %.y% + 8.4]/*8.8
43     text 'R. Krockner, O. Büchenschütz-Nothdurft, K. Lindner
44         (ANT XIX 2)' LL
45
46 /* --- Data processing -----
```

```
40
41 textsymbol 20; textstyle typeset; textsize 0.3
42   move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 7.6]/*7.9 - eins zu tief
43     text 'Data processing' LL
44 &type 'Data processing'
45 textsymbol 18; textsize 0.3; textstyle typeset
46   move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 7.2]/*7.5 - eins zu tief
47     text 'Position editing by H. Hinze, T. Schöne and A.Iffland
48         (HYDROMAP OFFLINE and CARIS HIPS)' LL
49   move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 6.8]/*7.1 - eins zu tief
50     text 'Depth editing by A.Iffland (CARIS HIPS)' LL
51   move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 6.4]/*6.7 - eins zu tief
52     text 'DEM modelling, contouring and cartography by A.Iffland
53         (ArcInfo)' LL
54
55 /* --- References -----
56
57 textsymbol 20; textstyle typeset; textsize 0.3
58   move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 5.6]/*5.9 - eins zu tief
59     text 'References' LL
60 &type 'References'
61 textsymbol 18; textsize 0.3; textstyle typeset
62   move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 5.2]
63     text 'Bathmann, U. et al. (Eds.): The Expeditions ANTARKTIS IX/1-4
64         of RV "Polarstern" 1990/91, Reports on Polar Research,' LL
65   move [calc %.x% + 1.7] [calc %.y% + 4.8]
66     text 'Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research,
67         Bremerhaven, 1992.' LL
68   move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 4.4]
69     text 'Jokat, W. and Krause, G. (Eds.): The Expedition ANTARKTIS
70         XIX/1-2 of RV "Polarstern" in 2001/02, Reports on Polar and Marine
71         Research,' LL
72   move [calc %.x% + 1.7] [calc %.y% + 4.0]
73     text 'Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research,
74         Bremerhaven, 2003.' LL
75
76 /* --- C&P -----
77
78   move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 3.0]/*3.2
79     text 'Vertical reference system: Mean Sea Level. Vertical datum:
80         Instantaneous Sea Level.' LL
81   move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 2.6]/*2.8
82     text 'Depth are shown in meters assuming a sound velocity in water
83         of 1500 m/s.' LL
84
85   move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 2.0]/*2.2
86     text 'This product is not intended for navigational purposes.' LL
87
88
```

```
79  move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 1.4]/*1.6
80    text 'Reproduction in any form without the written permission of the
      publisher is prohibited.' LL
81  move [calc %.x% + 1] [calc %.y% + 1.0]/*1.2
82    text 'Copyright !pat493; Alfred Wegener Institute for Polar and Marine
      Research, Bremerhaven, 2002.' LL
83
84 &type '....plot-source fertig....'
85
86 &return
```

C.6 AML-Quelltext zur Kartenlegende

```

1 /* -----
2 /* %~~~~~AML-SubScript zur Kartenlegende~~~~~%
3 /* -----
4 textcolor black; textsize 0.8
5 move [calc %.x% + 11.5] [calc %.y% + 14.6]
6   text 'Legend' LC
7
8 /* *****
9 /*  Legendenpolygone
10 /* *****
11 &setvar x = [calc %.x% - 3.5] /*[calc %.x% - 2]
12 &setvar y = [calc %.y% + 1] /*[calc %.y% + 0]
13
14 linesymbol 1; linecolor 4; shadetype color
15
16 shadecolor cmyk 9 3 0 0   /* T_STUFE 1
17   patch [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 11.5] [calc %x% + 7.8]
18     [calc %y% + 12.3]
19   box [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 11.5] [calc %x% + 7.8]
20     [calc %y% + 12.3]
21 shadecolor cmyk 16 4 0 0   /* T_STUFE 2
22   patch [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 10.7] [calc %x% + 7.8]
23     [calc %y% + 11.5]
24   box [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 10.7] [calc %x% + 7.8]
25     [calc %y% + 11.5]
26 shadecolor cmyk 22 7 0 0   /* T_STUFE 3
27   patch [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 9.9] [calc %x% + 7.8]
28     [calc %y% + 10.7]
29   box [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 9.9] [calc %x% + 7.8]
30     [calc %y% + 10.7]
31 shadecolor cmyk 28 9 0 0   /* T_STUFE 4
32   patch [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 9.1] [calc %x% + 7.8]
33     [calc %y% + 9.9]
34   box [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 9.1] [calc %x% + 7.8]
35     [calc %y% + 9.9]
36 shadecolor cmyk 35 11 0 0   /* T_STUFE 5
37   patch [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 8.3] [calc %x% + 7.8]
38     [calc %y% + 9.1]
39   box [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 8.3] [calc %x% + 7.8]
40     [calc %y% + 9.1]
41 shadecolor cmyk 42 15 0 0   /* T_STUFE 6
42   patch [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 7.5] [calc %x% + 7.8]
43     [calc %y% + 8.3]
44   box [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 7.5] [calc %x% + 7.8]
45     [calc %y% + 8.3]
46 shadecolor cmyk 50 19 0 0   /* T_STUFE 7

```

```

35  patch [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 6.7] [calc %x% + 7.8]
    [calc %y% + 7.5]
36  box [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 6.7] [calc %x% + 7.8]
    [calc %y% + 7.5]
37  shadecolor cmyk 55 23 0 0 /* T_STUFE 8
38  patch [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 5.9] [calc %x% + 7.8]
    [calc %y% + 6.7]
39  box [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 5.9] [calc %x% + 7.8]
    [calc %y% + 6.7]
40  shadecolor cmyk 62 27 0 0 /* T_STUFE 9
41  patch [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 5.1] [calc %x% + 7.8]
    [calc %y% + 5.9]
42  box [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 5.1] [calc %x% + 7.8]
    [calc %y% + 5.9]
43
44  /*----- Not surveyed area
45  shadecolor cmyk 3 0 15 0 /* Not Surveyed Area
46  patch [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 3.5] [calc %x% + 7.8]
    [calc %y% + 4.3]
47  box [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 3.5] [calc %x% + 7.8]
    [calc %y% + 4.3]
48
49  /*-----Antarktis: ice shelf und grounded ice
50  linesymbol 1; linecolor black; shadetype color
51
52  shadecolor rgb 230 230 230 /* Ice Shelf
53  patch [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 1.3] [calc %x% + 7.8]
    [calc %y% + 2.1]
54  box [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 1.3] [calc %x% + 7.8]
    [calc %y% + 2.1]
55  shadecolor rgb 190 190 190 /* Grounded Ice
56  patch [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 0.3] [calc %x% + 7.8]
    [calc %y% + 1.1]
57  box [calc %x% + 6.5] [calc %y% + 0.3] [calc %x% + 7.8]
    [calc %y% + 1.1]
58
59  /* *****
60  /*  Legenden-Polygontext erzeugen
61  /* *****
62
63  &setvar x = [calc %.x% + 2.6] /*[calc %.x% + 4.1]
64  &setvar y = [calc %.y% + 1.05] /*[calc %.y% + 0.05]
65
66  textsize 0.4
67  move [calc %x% + 0.4] [calc %y% + 13.1]; text 'Depth' UL
68  move [calc %x% + 3.2] [calc %y% + 13.1]; text 'Meters' UR
69
70  move [calc %x% + 3.2] [calc %y% + 12.3]; text '0' CR

```

```
71  move [calc %x% + 3.2] [calc %y% + 11.5]; text '500' CR
72  move [calc %x% + 3.2] [calc %y% + 10.7]; text '1000' CR
73  move [calc %x% + 3.2] [calc %y% + 9.9]; text '1500' CR
74  move [calc %x% + 3.2] [calc %y% + 9.1]; text '2000' CR
75  move [calc %x% + 3.2] [calc %y% + 8.3]; text '2500' CR
76  move [calc %x% + 3.2] [calc %y% + 7.5]; text '3000' CR
77  move [calc %x% + 3.2] [calc %y% + 6.7]; text '3500' CR
78  move [calc %x% + 3.2] [calc %y% + 5.9]; text '4000' CR
79  move [calc %x% + 3.2] [calc %y% + 5.1]; text '4500' CR
80
81  move [calc %x% + 2.5] [calc %y% + 3.7]; text 'Unsurveyed,
    morphological interpolated contours' CL
82
83  move [calc %x% + 2.5] [calc %y% + 1.5]; text 'Ice Shelf' CL
84  move [calc %x% + 2.5] [calc %y% + 0.5]; text 'Grounded Ice' CL
85
86 /* *****
87 /*  Legenden-Arcs und Arc-Beschriftung
88 /* *****
89
90 &setvar x = [calc %.x% + 8.1]
91 &setvar y = [calc %.y% + 1.05]
92
93 linesize 0.0075; linecolor 4
94  line [calc %x% + 0.7] [calc %y% + 11.85] [calc %x% + 3.3]
    [calc %y% + 11.85]
95
96 linesize 0.02
97  line [calc %x% + 0.7] [calc %y% + 11.05] [calc %x% + 1.6]
    [calc %y% + 11.05]
98  line [calc %x% + 2.4] [calc %y% + 11.05] [calc %x% + 3.3]
    [calc %y% + 11.05]
99
100 linesize 0.0075; linecolor rgb 175 175 175
101  line [calc %x% + 0.7] [calc %y% + 10.25] [calc %x% + 3.3]
    [calc %y% + 10.25]
102
103 linesize 0.02
104  line [calc %x% + 0.7] [calc %y% + 9.45] [calc %x% + 1.6]
    [calc %y% + 9.45]
105  line [calc %x% + 2.4] [calc %y% + 9.45] [calc %x% + 3.3]
    [calc %y% + 9.45]
106
107 textsize 0.5
108  move [calc %x% + 8.1] [calc %y% + 13.1]
109  text 'Depths Contours' UR
110
111 textsize 0.4
```

```
112 move [calc %x% + 11.6] [calc %y% + 11.9]
113 text '50m intervals of high resolution bathymetry' CR
114 move [calc %x% + 11.6] [calc %y% + 11.1]
115 text '250m intervals of high resolution bathymetry' CR
116
117 textsize 0.25; textcolor 4
118 move [calc %x% + 2] [calc %y% + 11.1]
119 text '2500' CC
120
121 textsize 0.4; textcolor black
122 move [calc %x% + 11.6] [calc %y% + 10.3]
123 text '100m intervals of background bathymetry' CR
124 move [calc %x% + 11.6] [calc %y% + 9.5]
125 text '500m intervals of background bathymetry' CR
126
127 textsize 0.25; textcolor rgb 175 175 175
128 move [calc %x% + 2] [calc %y% + 9.5]
129 text '2500' CC
130
131 /* *****
132 /* Projection Information
133 /* *****
134
135 textsize 0.5; textcolor 1
136 move [calc %x% + 8.6] [calc %y% + 8.75]
137 text 'Projection Information' UR
138
139
140 &setvar x = [calc %.x% + 6.0]
141 &setvar y = [calc %.y% + 1.05]
142
143 textsize 0.4
144
145 move [calc %x% + 4.7] [calc %y% + 7.3]; text 'Scale:' LL
146 move [calc %x% + 4.7] [calc %y% + 6.7]; text 'Projection:' LL
147 move [calc %x% + 4.7] [calc %y% + 6.1]; text 'Standard Parallel:' LL
148 move [calc %x% + 4.7] [calc %y% + 5.5]; text 'Horizontal datum:' LL
149
150
151 &setvar x = [calc %.x% + 6.0]
152 &setvar y = [calc %.y% + 1.05]
153
154 move [calc %x% + 11.6] [calc %y% + 7.3]; text '1 : 250 000' LR
155 move [calc %x% + 11.6] [calc %y% + 6.7]; text 'Mercator' LR
156 move [calc %x% + 11.6] [calc %y% + 6.1]; text "69°30'S" LR
157 move [calc %x% + 11.6] [calc %y% + 5.5]; text "WGS 1984" LR
158
159 textoffset 0 0
```

```

160
161 /* *****
162 /* Masstäbe erzeugen:
163 /* *****
164
165 /* ++++++
166 /* kilometres scalebar
167 /* ++++++
168
169 &setvar x = [calc %.x% + 7.0]
170 &setvar y = [calc %.y% + -1.0]
171
172 linesize 0.02; linecolor black
173
174 box [calc %.x% + 5.135] [calc %.y% + 3.8] [calc %.x% + 13.535]
    [calc %.y% + 4]
175
176 line [calc %.x% + 5.215] [calc %.y% + 3.8] [calc %.x% + 5.215]
    [calc %.y% + 4] /* 0.8
177 line [calc %.x% + 5.295] [calc %.y% + 3.8] [calc %.x% + 5.295]
    [calc %.y% + 4] /* 0.6
178 line [calc %.x% + 5.375] [calc %.y% + 3.8] [calc %.x% + 5.375]
    [calc %.y% + 4] /* 0.4
179 line [calc %.x% + 5.455] [calc %.y% + 3.8] [calc %.x% + 5.455]
    [calc %.y% + 4] /* 0.2
180 line [calc %.x% + 5.535] [calc %.y% + 3.8] [calc %.x% + 5.535]
    [calc %.y% + 4] /* 0.0
181 line [calc %.x% + 7.535] [calc %.y% + 3.8] [calc %.x% + 7.535]
    [calc %.y% + 4] /* 5.0
182 line [calc %.x% + 9.535] [calc %.y% + 3.8] [calc %.x% + 9.535]
    [calc %.y% + 4] /* 10.0
183 line [calc %.x% + 11.535] [calc %.y% + 3.8] [calc %.x% + 11.535]
    [calc %.y% + 4] /* 15.0
184 line [calc %.x% + 13.535] [calc %.y% + 3.8] [calc %.x% + 13.535]
    [calc %.y% + 4] /* 20.0
185
186 linesize 0.08
187
188 line [calc %.x% + 5.215] [calc %.y% + 3.9] [calc %.x% + 5.295]
    [calc %.y% + 3.9] /* 0.8 - 0.6
189 line [calc %.x% + 5.375] [calc %.y% + 3.9] [calc %.x% + 5.455]
    [calc %.y% + 3.9] /* 0.4 - 0.2
190 line [calc %.x% + 5.535] [calc %.y% + 3.9] [calc %.x% + 7.535]
    [calc %.y% + 3.9] /* 0 - 5
191 line [calc %.x% + 9.535] [calc %.y% + 3.9] [calc %.x% + 11.535]
    [calc %.y% + 3.9] /* 10 - 15
192
193 /* -----

```

```
194 /* scalebar Beschriftung
195 /* -----
196
197 textoffset 0 0
198 textsize 0.4; textcolor black
199
200 move [calc %x% + 9.25] [calc %y% + 4.2]
201 text "Kilometers at Standard Parallel" LC
202
203 textoffset 0 -0.15; textsize 0.35; textoffset 0 0.03
204
205 move [calc %x% + 5.135] [calc %y% + 3.8]; text '1' UC
206 move [calc %x% + 5.535] [calc %y% + 3.8]; text '0' UC
207 move [calc %x% + 7.535] [calc %y% + 3.8]; text '5' UC
208 move [calc %x% + 9.535] [calc %y% + 3.8]; text '10' UC
209 move [calc %x% + 11.535] [calc %y% + 3.8]; text '15' UC
210 move [calc %x% + 13.535] [calc %y% + 3.8]; text '20' UC
211
212 textoffset 0 0
213
214 /* ++++++
215 /* nautical miles scalebar
216 /* ++++++
217
218 &setvar x = [calc %.x% + 7.0]
219 &setvar y = [calc %.y% + -0.7]
220
221 linesize 0.02; linecolor black
222
223 box [calc %x% + 5.21] [calc %y% + 2] [calc %x% + 13.359]
    [calc %y% + 2.2]
224
225 line [calc %x% + 5.358] [calc %y% + 2] [calc %x% + 5.358]
    [calc %y% + 2.2] /* 0.8
226 line [calc %x% + 5.506] [calc %y% + 2] [calc %x% + 5.506]
    [calc %y% + 2.2] /* 0.6
227 line [calc %x% + 5.654] [calc %y% + 2] [calc %x% + 5.654]
    [calc %y% + 2.2] /* 0.4
229 line [calc %x% + 5.803] [calc %y% + 2] [calc %x% + 5.803]
    [calc %y% + 2.2] /* 0.2
230 line [calc %x% + 5.951] [calc %y% + 2] [calc %x% + 5.951]
    [calc %y% + 2.2] /* 0.0
231 line [calc %x% + 7.432] [calc %y% + 2] [calc %x% + 7.432]
    [calc %y% + 2.2] /* 2.0
232 line [calc %x% + 8.914] [calc %y% + 2] [calc %x% + 8.914]
    [calc %y% + 2.2] /* 4.0
233 line [calc %x% + 10.396] [calc %y% + 2] [calc %x% + 10.396]
    [calc %y% + 2.2] /* 6.0
```

```

234 line [calc %x% + 11.877] [calc %y% + 2] [calc %x% + 11.877]
    [calc %y% + 2.2] /* 8.0
235 line [calc %x% + 13.359] [calc %y% + 2] [calc %x% + 13.359]
    [calc %y% + 2.2] /* 10.0
236
237 linesize 0.08
238
239 line [calc %x% + 5.358] [calc %y% + 2.1] [calc %x% + 5.506]
    [calc %y% + 2.1] /* 0.8 - 0.6
240 line [calc %x% + 5.654] [calc %y% + 2.1] [calc %x% + 5.803]
    [calc %y% + 2.1] /* 0.4 - 0.2
241 line [calc %x% + 5.951] [calc %y% + 2.1] [calc %x% + 7.432]
    [calc %y% + 2.1] /* 0 - 2
242 line [calc %x% + 8.914] [calc %y% + 2.1] [calc %x% + 10.396]
    [calc %y% + 2.1] /* 4 - 6
243 line [calc %x% + 11.877] [calc %y% + 2.1] [calc %x% + 13.359]
    [calc %y% + 2.1] /* 8 - 10
244
245 /* -----
246 /* scalebar Beschriftung
247 /* -----
248
249 textsize 0.4; textcolor black
250
251 move [calc %x% + 9.25] [calc %y% + 2.4]
252 text "Nautical Miles at Standard Parallel" LC
253
254 textoffset 0 -0.15; textsize 0.35; textoffset 0 0.03
255
256 move [calc %x% + 5.21] [calc %y% + 2]; text '1' UC
257 move [calc %x% + 5.951] [calc %y% + 2]; text '0' UC
258 move [calc %x% + 7.432] [calc %y% + 2]; text '2' UC
259 move [calc %x% + 8.914] [calc %y% + 2]; text '4' UC
260 move [calc %x% + 10.396] [calc %y% + 2]; text '6' UC
261 move [calc %x% + 11.877] [calc %y% + 2]; text '8' UC
262 move [calc %x% + 13.359] [calc %y% + 2]; text '10' UC
263
264 textoffset 0 0
265
266 &return

```


D Bathymetrische Karte des Canyon-Systems nahe Fimbulisen 1 : 250 000

D.1 Canyon System Bathymetry off Fimbulisen 1 : 250 000