GKSS FORSCHUNGSZENTRUM in der HELMHOLTZ-GEMEINSCHAFT

Quantifizierung morphologischer Veränderungen verklappter Sedimente vor der Küste Mecklenburg-Vorpommerns

Vom Fachbereich Geopysik der Universtät Leipzig als Diplomarbeit angenommen

Autorin:

K. Stockmann

GKSS 2005/5

ISSN 0344-9629

HELMHOLTZ GEMEINSCHAFT GKSS ist Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V.

GKSS 2005/5

Quantifizierung morphologischer Veränderungen verklappter Sedimente vor der Küste Mecklenburg-Vorpommerns

Vom Fachbereich Geopysik der Universtät Leipzig als Diplomarbeit angenommen

Autorin:

K. Stockmann

(Institut für Küstenforschung)

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH • Geesthacht • 2005

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

Anforderungen/Requests:

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

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

ISSN 0344-9629

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH · Telefon (04152)87-0
Max-Planck-Straße 1 · D-21502 Geesthacht / Postfach 11 60 · D-21494 Geesthacht

GKSS 2005/5

Quantifizierung morphologischer Veränderungen verklappter Sedimente vor der Küste Mecklenburg-Vorpommerns

(Vom Fachbereich Geopysik der Universtät Leipzig als Diplomarbeit angenommen)

Karina Stockmann

139 Seiten mit 97 Abbildungen und 14 Tabellen

Zusammenfassung

Die Arbeit befasst sich mit den Veränderungen der Morphologie zweier experimenteller Verklappungen von Sedimenten, welche im Rahmen des Verbundprojektes DYNAS (Dynamik natürlicher und anthropogener Sedimente in der Ostsee) vom Institut für Ostseeforschung Warnemünde angelegt wurden.

Die Verklappungsstelle wurde seit Juni 2001 fünfmal mit einem Fächerecholotsystem vermessen. Mit der Genauigkeit der erhobenen Daten war es möglich Aussagen über Formveränderungen, Massenbilanzen und insbesondere über Veränderungen der Oberflächenstrukturen bzw. der Rauhigkeit zu treffen.

Investigation of an experimental dumping-site offshore Mecklenburg-Vorpommern

Abstract

The investigation deals with morphological changes of two experimental areas of ocean dumping, which are a part of the project DYNAS (Dynamic of natural and anthropogenic sediments in the Baltic Sea) of the Institut für Ostseeforschung Warnemünde.

Since June 2001 the dumping area has been measured five times with a multibeam echo sounder system. With the achieved data precision it was possible to investigate surface deformations, mass balances and in particular the surface texture and roughness.

Manuskripteingang in TDB: 3. Mai 2005

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung 1

1.1 Projekt DYNAS 1

1.2 Das Verklappungsexperiment 2

1.3 Aufgabenstellung 5

2 Grundlagen 7

2.1 Kartographische Bezugssysteme 7

2.1.1 WGS84-Koordinaten 7

2.1.2 Gauß-Krüger-Koordinaten 9

2.2 Funktionsweise des Fächerecholotsystems und seiner Einzelkomponenten 12

2.2.1 PDGPS 13

2.2.2 Kreiselkompass 16

2.2.3 Bewegungssensor 17

2.2.4 Fächerecholot 19

2.2.5 Wasserschallsonde 23

2.3 Kalibrierung des Messsystems 26

2.3.1 Stampfkalibrierung 26

2.3.2 Rollkalibrierung 27

2.4 Datenaufnahme und -bearbeitung 28

2.4.1 Merlin© 28

2.4.2 Neptune© 28

2.4.3 CFloor© 29

2.4.4 MorphDyn© 29

2.5 Erstellung eines Geländemodells 30

3 Planung und Durchführung der Messkampagnen 37

3.1 Planung der Messung 37

3.2 Systemkonfiguration an Bord der LUDWIG PRANDTL 40

3.3 Beschreibung der Messkampagnen 42

3.3.1 Nullmessung, 18. + 20. Juni 2001 42
3.3.2 Erste Vermessung: 25. + 26. Juni 2001 43
3.3.3 Zweite Vermessung: 20. + 21. August 2001 43
3.3.4 Dritte Vermessung: 25. Oktober 2002 44
3.3.5 Vierte Vermessung: 15. + 16. Oktober 2003 49

4 Korrektur der Geländemodelle 51
4.1 Fehlereffekte 51
4.2 Offset 51
4.2.1 Fehlerquelle des Offsets 52
4.2.2 Durchführung der Offsetkorrektur 53
4.3 Wellenstrukturen 56
4.3.1 Fehlerquelle der Wellenstrukturen..... 56
4.3.2 Korrektur der Wellenstrukturen 57
4.4 Verwendbarkeit der Messdaten 60

5 Auswertungsmethoden 65
5.1 Berechnung der Kraterbreite 65
5.2 Volumenuntersuchungen 66
5.3 Untersuchung der Richtung – Optischer Fluss 69
5.4 Untersuchung der Rauhigkeit – Varianz der Laplace Pyramide 73

6 Darstellung der Ergebnisse 79
6.1 Kartendarstellungen 79
6.2 Allgemeine Abmessungen, Formparameter 84
6.2.1 Beschreibung der Mergelstrukturen 84
6.2.2 Beschreibung der Mischbodenstrukturen 88
6.3 Volumenveränderungen 90
6.3.1 Differenzbilder 90
6.3.2 Absolute Volumenbilanzen 94
6.3.3 Tiefenabhängige Volumenveränderungen 94
6.4 Richtung der Verlagerungen 97
6.5 Rauhigkeit 99

7 Fehlerbetrachtung 101
7.1 Allgemein 101
7.2 Volumen 103
7.2.1 Differenzbilder 103
7.2.2 Absolute Volumenbilanzen 103
7.2.3 Tiefenabhängige Volumenuntersuchung 104
7.3 Richtung 105
7.4 Rauhigkeit 105

8 Interpretation 107

9 Fazit und Ausblick 115

10 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis 117

11 Quellenverzeichnis 121

ANHANG
A Formelherleitung der Datendichte 123
B Beaufort-Skala 125
C Neue Module in MorphDyn© 127

Danksagung

1 Einführung

1.1 Projekt DYNAS

Die vorliegende Diplomarbeit hat ihren Ursprung im Forschungsprogramm des Institutes für Ostseeforschung Warnemünde (IOW).
Dieses Forschungsprogramm umfasst Meeresforschung in Küsten- und Randmeeren unter 5 Forschungsschwerpunkten:

- Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee und die Sauerstoffversorgung des Tiefenwassers,
- Energie- und Stoffaustausch zwischen Küstengewässern und offener Ostsee,
- Prozesse in der Wassersäule und an den Grenzschichten,
- Langfristige Veränderungen in der Ostsee,
- Überwachung der Meeresumwelt.

Die Ostsee dient dabei als ideales Fallbeispiel direkt vor der Haustür. Das gemeinsame Ziel aller Fachrichtungen ist die Entwicklung eines Ökosystemmodells für die Ostsee, ein Computermodell, in dem alle Informationen und Daten zusammenfließen.

Die vorliegende Diplomarbeit ist eingebettet in das Projekt DYNAS, das vom Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) koordiniert wird.

DYNAS steht für **Dy**namik **n**atürlicher und **a**nthropogener **S**edimentation.

Das Projekt sollte vertiefende Einblicke in Sedimentationsprozesse in der Mecklenburger Bucht liefern [1]. Ziel war es, das Verständnis für die wesentlichen Prozesse der Sedimentdynamik zu verbessern und daraus ein numerisches Modell der Sedimentdynamik zu entwickeln. In diesem Modell sollten Strömungsprozesse, sedimentologische Prozesse und biologische Einflüsse auf das Sedimentmaterial integriert werden.

Das Modell sollte die Möglichkeit bieten, verschiedene Szenarien des Sedimenttransports unter veränderlichen Randbedingungen voraus zu berechnen.

Anwendung findet es zum Beispiel bei der Abschätzung der ökologischen Auswirkungen nach dem Abbau submariner Lagerstätten oder bei der Vorhersage von Sedimenttransporten bei Verklappungen (Entsorgung von Materialien im Meer).

Das Modell wurde speziell für das Seegebiet zwischen der Mecklenburger Bucht und dem Arkonabecken entworfen. Dort soll es vor allem bei der Abschätzung der Auswirkungen des ausgebaggerten, teilweise schadstoffbelasteten Materials aus Häfen, Flüssen und Flussmündungen eingesetzt werden.

Die Ausbaggerung der Wasserwege ist notwendig, um der Versandung durch Meeresströmungen entgegen zu wirken und die Wasserwege für immer tiefer gehende Schiffe befahrbar zu machen. Bereits vor der Verklappung des Baggergutes im Meer sollte ausgeschlossen werden, dass das Material von den ausgewählten Klappgebieten weitertransportiert wird, um eine erneute Versandung und Verschlickung der Fahrrinnen und eine Umlagerung und Verbreitung von Schadstoffen in der Ostsee möglichst gering zu halten.

1.2 Das Verklappungsexperiment

Am 20. und 21. Juni 2001 wurde eine experimentelle Verklappung vor der Küste Nienhagens durchgeführt. Das ausgewählte Gebiet befindet sich ca. 16 km westlich von Warnemünde und ca. 6 km von der Küste entfernt (*siehe Abbildung 1*).

Die experimentelle Verklappung dient der genaueren Untersuchung der physikalischen Prozesse, welche in Wasserkörper und Gewässersohle ausgelöst werden. Die Auswirkungen des Versuchs wurden über mehrere Jahre hinweg beobachtet und untersucht.

Die Klappstelle wurde nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- der Seegrund musste sich noch in einem natürlichen, wenig anthropogen beeinflusstem Zustand befinden;
- es sollten sedimentologisch, morphologisch, chemisch und biologisch ungestörte Verhältnisse vorliegen;
- die Entfernung zu zwei weiteren Untersuchungsgebieten des Instituts für Ostseeforschung Warnemünde östlich und westlich von Warnemünde musste groß genug sein, um eine Beeinflussung der Gebiete untereinander zu vermeiden;
- es sollte sich in der Nähe zum Hafen von Warnemünde befinden, um eine Kostenminimierung bei der Verklappung und bei den Messfahrten zu gewährleisten.



Abbildung 1: Lage der Klappstelle in der Ostsee.

Da diese Region stark befischt wird, wurde über der Klappstelle eine Sperrzone von ca. 500 m x 500 m eingerichtet und mit vier Begrenzungsbojen abgegrenzt, um eine Beeinflussung des Experiments durch die Befischung mit Schleppnetzen und Schleppbrettern auszuschließen.

Schließlich wurde im Juni 2001 ein Volumen von ca. 2900 m³ Mergel und ca. 2500 m³ Mischboden verklappt, wobei der Mischboden aus mehr als 50 % Sand und einem Restanteil aus Mergel-, Mudde- und Torfbrocken bestand. Der Mergel bestand aus sedimentierten Brocken, welche eine Ausdehnung von bis zu einem Meter hatten. Dabei wurden zur Verklappung des Mergelmaterials vier und zur Verklappung des Mischbodens drei Einzelverklappungen durchgeführt. Das Material stammte aus einer Sandfanggrube, welche sich nördlich der Westmole von Warnemünde und westlich des Seekanals befindet.

Die Erkundung des Seebodens durch einen Taucher im Juni 2001 (vor der Verklappung) ergab, dass der Boden der Klappstelle aus festem Sand besteht und eine Wellenstruktur mit einer Amplitude von ca. 0,02 m und einer Wellenlänge von ca. 0,2 m aufweist.
Die Ausprägung der Verklappungsstrukturen wurden mit einem Fächerecholotsystem auf dem Flachwasserforschungsschiff LUDWIG PRANDTL über einem Gesamtgebiet von ca. 900 m x 900 m im Zeitraum von Juni 2001 bis Oktober 2003 fünfmal vermessen.

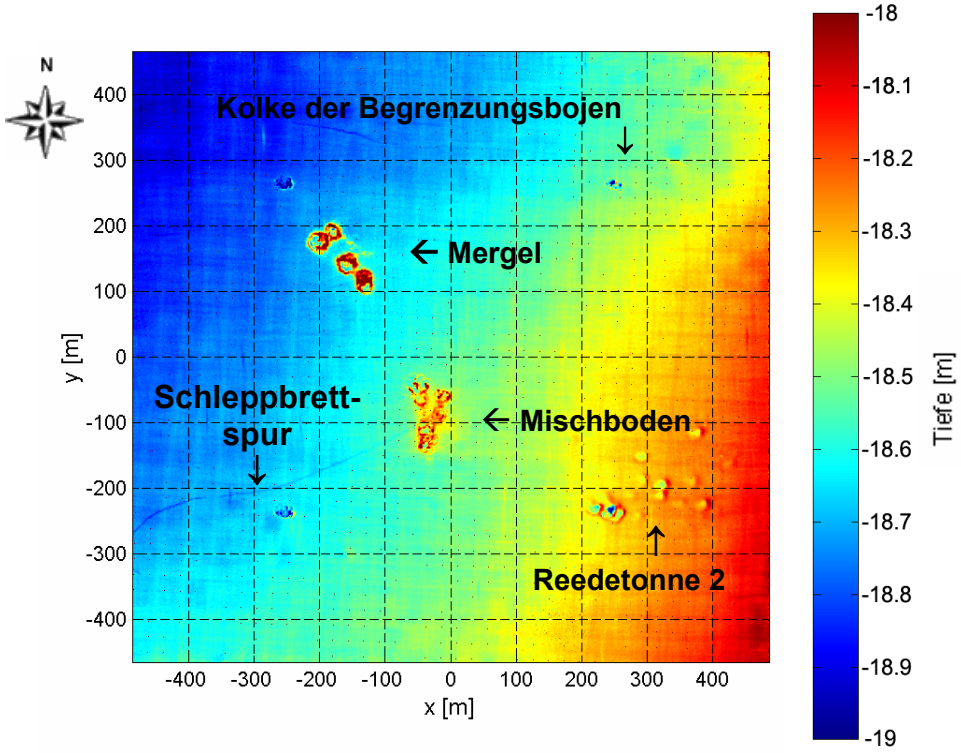


Abbildung 2: Mit dem Fächerecholot erstellte Seebodenkarte der Klappstelle.vom August 2001.

Auf der Seebodenkarte (*siehe Abbildung 2*) sieht man deutlich vier Krateraus-

bildungen der Mergelverklappung im Nordwesten und die Strukturen der Mischbodenverklappung im Zentrum des Klappgebietes. Des weiteren sind auch die Ausprägungen der vier Begrenzungsbojen der Sperrzone und die Spuren einer älteren Markierungstonne (Reedetonne 2) im Südosten des Messgebietes zu erkennen.
Außerdem befindet sich im Südwesten eine ca. 2 m breite und 0,1–0,2 m tiefe Schleppbrettspur. Diese Schleppbrettspur ist in allen Vermessungen wiederzufinden und hat sich seit Juni 2001 nicht nachweisbar verändert. Anhand dieser Spur können Aussagen über die Plausibilität des Geländemodells gemacht werden. Zusätzlich können anhand dieser Schleppbrettspur Aussagen darüber gemacht werden, ob auf den Klappstellen natürliche Veränderungen stattgefunden haben, wie zum Beispiel eine großflächige Materialzunahme oder -abnahme.
Die durchschnittliche Wassertiefe über der Klappstelle beträgt etwa 18,5 m, wobei der Seeboden mit einer Tiefe von 18 m im Südosten und 19 m im Nordwesten um ca. 0,045° geneigt ist. Die Tiefenangaben beziehen sich auf Normalnull (NN) Amsterdamer Pegel.

1.3 Aufgabenstellung

Im Zeitraum vom Juni 2001 bis zum Oktober 2003 fanden fünf Vermessungen mit dem Fächerecholotsystem des Instituts für Küstenforschung, GKSS, Geesthacht, über der Klappstelle statt. Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollten diese Datensätze ausgewertet und quantitative Aussagen über morphologische Veränderungen der verklappten Materialien getroffen werden.

Die untersuchten Kenngrößen waren:

- Volumenveränderungen der Verklappungsstrukturen,
- der Materialtransport und seine Richtung,
- Rauhigkeitsveränderungen der Oberfläche.

Aus der Diplomarbeit „Untersuchungen der Bathymetrie einer experimentellen Verklappungsstelle mittels Fächerecholotmessungen“ von Gerrit Gruß [2] ist bekannt, dass die zu erwartenden Veränderungen sehr gering sind. Deshalb mussten hohe Anforderungen an die Reproduzierbarkeit der Messungen gestellt werden. Um die Effekte dennoch darstellen zu können, wurden moderne Bildverarbeitungsmethoden verwendet, die über einfache Korrelationsanalysen hinausgehen.

2 Grundlagen

2.1 Kartographische Bezugssysteme

Bei der Erarbeitung und Auswertung der Seebodenkarten des Verklappungsgebietes kamen zwei kartographische Bezugssysteme zum Einsatz:

- das WGS84-Koordinatensystem,
- das Gauss-Krüger-Koordinatensystem.

Die Aufnahme der Positionsdaten des Forschungsschiffes bzw. des Fächerecholots erfolgten mit dem Satellitensystem GPS im WGS84-Koordinatensystem, welches die Erde als Ellipsoiden annähert und seinen Koordinatenursprung ins Massezentrum des Ellipsoiden legt (*siehe Abbildung 3*).

Die Darstellung der Geländemodelle erfolgte mittels Gauß-Krüger-Koordinaten, weil dieses Koordinatensystem die Daten in einem rechtwinkligem Koordinatensystem abbildet (*siehe Abbildung 4*).

2.1.1 WGS84-Koordinaten

Das WGS84-Koordinatensystem (**W**orld **G**eodetic **S**ystem 1984) [2] kann in kartesischen Koordinaten (X, Y und Z) oder in terrestrischen Koordinaten (λ, φ und h) dargestellt werden (*siehe Abbildung 3*).
Der Koordinatenursprung liegt im Massenzentrum eines der gesamten Masse der Erde angenäherten Ellipsoids.

Die Halbachsen des WGS84-Erdellipsoiden betragen:

a = 6.378.137 m (vom Mittelpunkt zum Äquator),

b = 6.356.752,315 m (vom Mittelpunkt zu den Polen).

Die Abplattung f des WGS84-Erdellipsoiden beträgt:

$$f = \frac{a - b}{a}$$

f = 1:298,25722

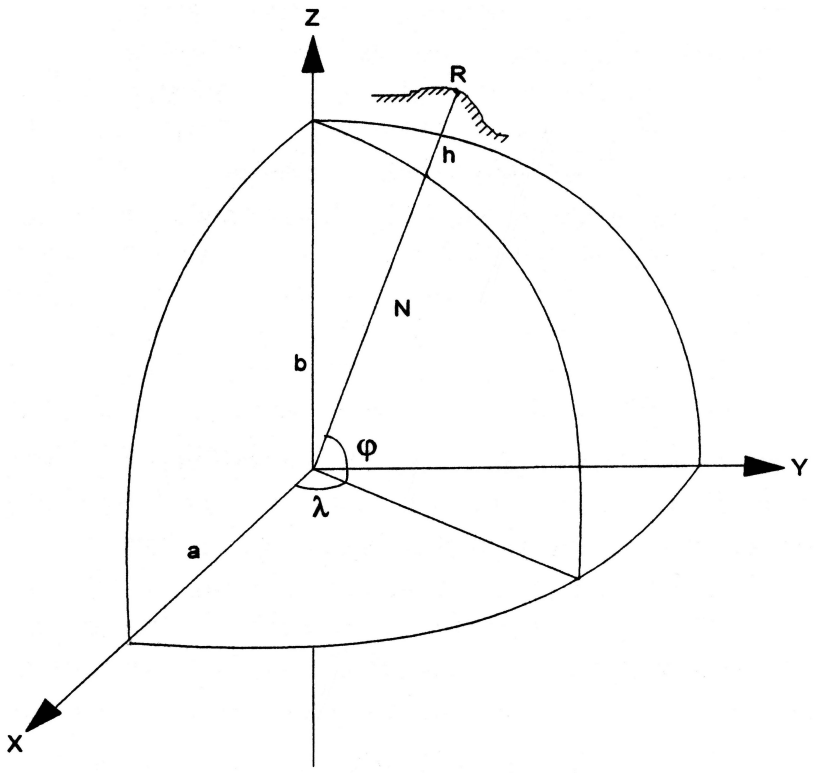


Abbildung 3: WGS84-Koordinatensystem (aus [3] bearbeitet).

Die Achsen des kartesischen Koordinatensystems sind so definiert, dass die positive X-Achse vom Massenzentrum durch den Schnittpunkt von Äquator und Greenwich-Meridian verläuft. Die positive Y-Achse liegt um 90° gegen Osten versetzt ebenfalls in der Äquatorebene und die positive Z-Achse verläuft durch den geographischen Nordpol.
Die terrestrischen Koordinaten liefern die Position mittels Längen- (λ) und Breitengrad (φ) in Grad, Minuten und Sekunden, wobei hier eine Sekunde dem hundertsten Teil einer Minute entspricht.

$$1s = \frac{1}{100}\min$$

Zusätzlich wird eine Höhenkoordinate h angegeben, welche die Höhe über dem WGS84-Referenzellipsoiden angibt.
Um die beiden Koordinatensysteme ineinander zu überführen muss eine weitere Variable eingeführt werden, der Radius N des Ellipsoiden an der entsprechenden Position.
Der Abstand R gibt die Entfernung vom Mittelpunkt des WGS84-Ellipsoiden zur gesuchten Position an der Oberfläche der Erde an und setzt sich aus dem Radius

des Ellipsoiden N und der Höhe h über dem Ellipsoiden zusammen.

$$R = h + N$$

Der Radius des Ellipsoiden an der gesuchten Position wird folgendermaßen berechnet:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(\varphi)}}$$

Mit der Exzentrizität der Ellipse:

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

Die Umrechnungsgleichungen von terrestrischen Koordinaten in kartesische Koordinaten lauten:

$$X = (N + h)\cos(\lambda)\cos(\varphi) = R\cos(\lambda)\cos(\varphi)$$

$$Y = (N + h)\sin(\lambda)\cos(\varphi) = R\sin(\lambda)\cos(\varphi)$$

$$Z = ((\frac{b^2}{a^2})N + h)\sin(\varphi) = ((\frac{b^2}{a^2})R)\sin(\varphi)$$

2.1.2 Gauß-Krüger-Koordinaten

Das Gauß-Krüger-Koordinatensystem ist ein kartographisches Bezugssystem, welches Positionsdaten in einem rechtwinkligen Koordinatensystem abbilden kann [4]. Es beruht auf einer winkeltreuen querachsigen Zylinderabbildung. Bei polständiger Lage des Zylinders wird diese Methode Mercator-Projektion genannt. Eine eindeutige Positionsbestimmung im Gauß-Krüger-Koordinatensystem benötigt einen Hochwert, einen Rechtswert und einen Höhenwert.

Das Gauß-Krüger-System bildet jeweils nur einen schmalen Meridianstreifen ab, dem ein Hauptmeridian zugrunde liegt (*siehe Abbildung 4*). Da die Verzerrungen der Abbildung seitwärts vom Berührungsgroßkreis sehr rasch zunehmen, hat man sie auf

drei Längengrade beschränkt. In nordsüdlicher Richtung findet keine Verzerrung statt.
Die dabei entstandenen einzelnen Kartenabschnitte werden durchnummeriert. Die Nummerierung erfolgt dabei vom Nullmeridian aus in östlicher Richtung. Jedes Einzelsystem erstreckt sich 1,5° östlich und westlich seines Hauptmeridians.
Daraus resultieren die Kennziffern wie folgt:

0° (Nullmeridian) = Kennziffer 0
3° östlicher Länge = Kennziffer 1
6° östlicher Länge = Kennziffer 2 u.s.w.

Für die Hochwerte wurde der Äquator als Nullpunkt festgelegt. Die Rechtswerte (angenäherte West-Ost-Strecken) wurden auf dem Hauptmeridian mit 500.000 m festgelegt. Die Höhenwerte sind auf den Bessel-Ellipsoiden bezogen.

Die Halbachsen des Bessel-Ellipsoiden von 1841 betragen:

a = 6.377.397,155 m (vom Mittelpunkt zum Äquator) und
b = 6.356.078,965 m (vom Mittelpunkt zu den Polen).

Die Abplattung des Bessel-Erdellipsoiden beträgt:

f = 1:299,15281.

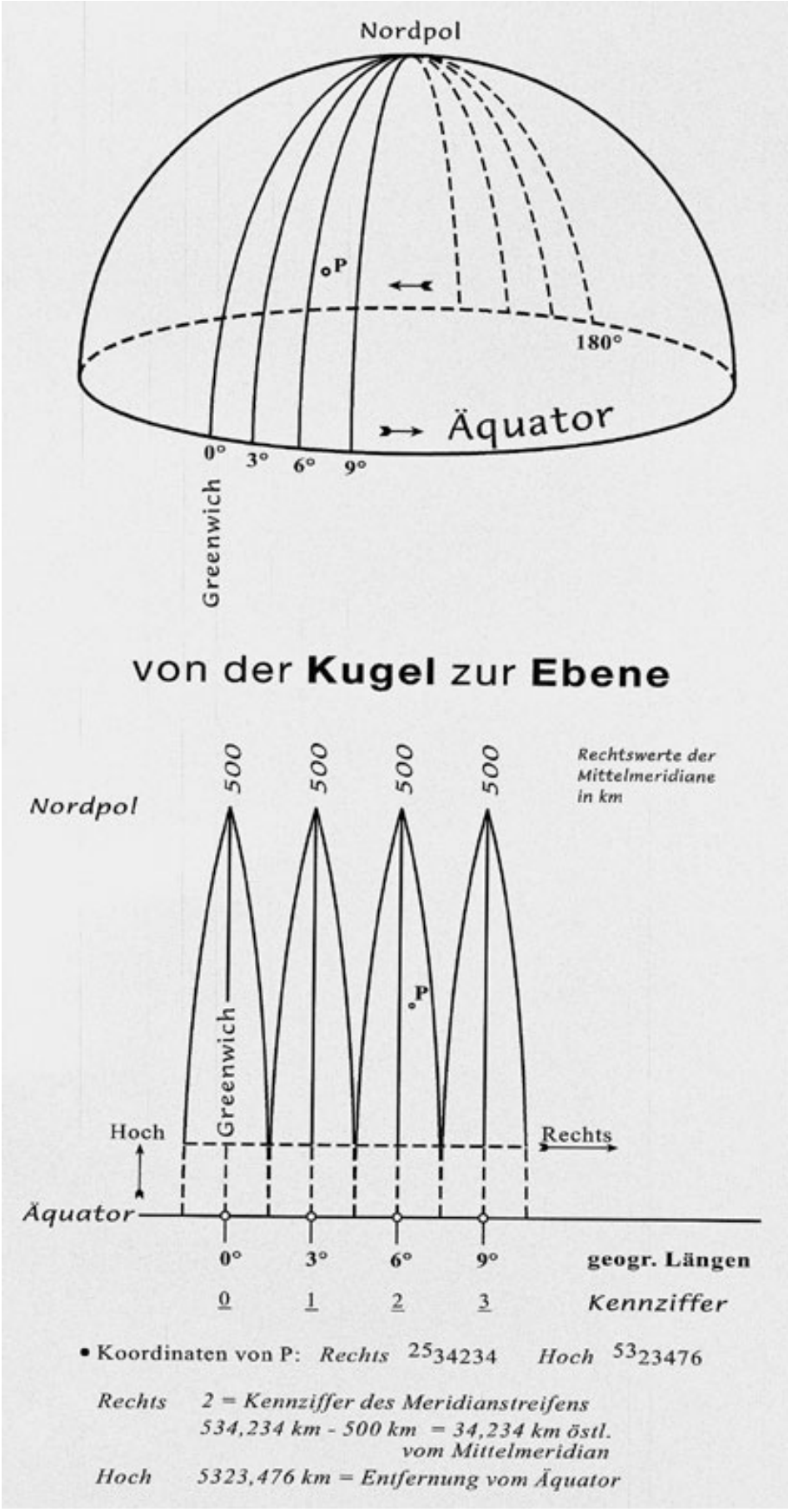


Abbildung 4: Gauß-Krüger-Koordinatensystem, Hoch- und Rechtswerte.

2.2 Funktionsweise des Fächerecholotsystems und seiner Einzelkomponenten

Die Vermessung erfolgte mit einem Fächerecholotsystem, welches auf dem Forschungsschiff LUDWIG PRANDTL (*siehe Abbildung 5*) installiert ist. Es besteht aus Fächerecholotschwinger, **P**recise **D**ifferential **G**lobal **P**ositioning **S**ystem (PDGPS), Bewegungssensor, Kreiselkompass und Wasserschallsonde.



Abbildung 5: Forschungsschiff LUDWIG PRANDTL.

Mit dem PDGPS werden die Positionen des Fächerecholotschwingers in WGS84-Koordinaten bestimmt.
Bewegungssensor und Kreiselkompass messen kontinuierlich die Veränderungen von Auslenkung und Ausrichtung des Schiffes durch Kurs, Wind und Wellenbewegung. Mit diesen Werten kann realisiert werden, dass der ausgesendete Signalfächer des Fächerecholots immer lotrecht und quer zur Fahrtrichtung ausgerichtet ist.
Währenddessen werden mit dem Fächerecholotschwinger regelmäßig Schallsignale ausgesendet und die Laufzeiten der reflektierten Signale gemessen. Da die Schallgeschwindigkeit in Wasser von Temperatur und Salzgehalt abhängig ist, ändert sie sich mit der Tiefe. Deshalb muss mit einer Wasserschallsonde ein Wasserschallprofil aufgenommen werden, um die verschiedenen Schallgeschwindigkeiten in unter-

schiedlicher Tiefe zu erhalten. Mit der Geschwindigkeit der Signale im Wasser und den gemessenen Laufzeiten wird dann der Abstand zwischen Fächerecholotschwinger und Seeboden der jeweiligen Position berechnet.

Da die Komponenten des Fächerecholotsystems an verschiedenen Orten auf dem Schiff installiert sind, muss ihre Lage zueinander nach der Installation auf dem Schiff genau eingemessen werden. Diese Messung muss bei absoluter Ruhelage des Schiffes durchgeführt werden, deswegen fand sie auf einer Werft in Oortkaten statt. Allen Geräten des Fächerecholotsystems wurden bei dieser Vermessung dreidimensionale Koordinatendifferenzen zu einem definierten Punkt auf dem Schiff zugewiesen, deren Genauigkeit bei unter einem Zentimeter lagen [5]. Mit der gemessenen Lage der Einzelkomponenten zueinander kann eine Karte des Tiefenreliefs des Seebodens erstellt werden.

2.2.1 PDGPS

Das **G**lobal **P**ositioning **S**ystem (GPS) ist ein Satellitensystem, mit dessen Hilfe die genaue Position eines Empfängers auf der Erde bestimmt werden kann [3], [6].

Das System besteht aus 24 Satelliten, welche in einer Entfernung von 20.200 km mit einer Umlaufzeit von 11 h 58 min die Erde auf sechs unterschiedlichen Bahnen umkreisen. Alle sechs Bahnebenen sind um 55° gegen die Äquatorebene und um 60° gegeneinander geneigt.

Die empfangenen Positionskoordinaten der Satelliten und die ausgewertete Position des Empfängers werden dabei auf den WGS84-Ellipsoiden bezogen.

Funktionsweise des PDGPS

Die GPS-Satelliten senden regelmäßig Datenpakete mit Angaben über Position und Sendezeit aus. Die Signale werden mit Lichtgeschwindigkeit übertragen. Ein Empfänger (*siehe Abbildung 6*) auf der Erde misst die Ankunftszeit des Signals und berechnet die Laufzeit (0,067 s bis 0,086 s). Aus Laufzeit und Geschwindigkeit des Signals kann dann die Entfernung des Satelliten vom Empfänger ermittelt werden.



Abbildung 6:
GPS-Empfänger auf der LUDWIG PRANDTL.

Befindet sich ein Satellit in WGS84-Koordinaten auf der Position (x_0, y_0, z_0) in einer Entfernung r_0 vom Empfänger, lässt sich eine Kugeloberfläche definieren, auf der sich der Empfänger befinden muss.

$$r_0^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2$$

Wenn die Zeit ohne Messfehler erfasst werden könnte, wären für eine eindeutige Positionsbestimmung mit den drei Unbekannten x, y und z drei Satelliten notwendig. Die Zweideutigkeit der Lösung kann dabei unbeachtet bleiben, da der zweite Schnittpunkt weiter vom Koordinatenursprung entfernt ist als die Umlaufbahn der Satelliten und damit ausgeschlossen werden kann.
Da aber ein Laufzeitfehler von einer tausendstel Sekunde bereits einen Distanzfehler von 300 km bewirken würde, wäre die erforderliche Präzision nur mit Atomuhren realisierbar. Bislang waren die kleinsten Atomuhren ca. 4800 cm³ groß und kosteten ca. 50.000 Dollar. Deshalb wurden sie nur in die Satelliten eingebaut. Für die Empfänger waren sie nicht finanzierbar (mittlerweile gibt es allerdings schon Atomuhren mit einer Abmessung von 40 cm³, welche in näherer Zukunft für ca. 2000 Dollar erhältlich werden sollen). Da der Empfänger bei allen Messungen mit einer weniger genauen Uhr auskommen muss, ist es nötig die Zeitdifferenz und damit den Distanzfehler D zu ermitteln.

$$(r_0 + D)^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2$$

Da der Distanzfehler D bei allen Messungen mit diesem Empfänger derselbe ist, kann die zusätzliche Unbekannte einfach durch Hinzunahme eines vierten Satelliten kompensiert werden.

Ohne Berücksichtigung der Relativitätstheorie würde das System allerdings versagen. Da sich die GPS-Satelliten mit einer Geschwindigkeit von 3,9 km/s bewegen,

kann der Effekt der Speziellen Relativitätstheorie nicht mehr vernachlässigt werden. Die Zeit an Bord der Satelliten erscheint aufgrund der hohen Geschwindigkeit gedehnt. Dieses Phänomen ist auch als das Zwillingsparadoxon bekannt: Ein Astronaut, der von einer Weltraumreise zurückkehrt, ist jünger als sein auf der Erde verbliebener Zwillingsbruder.
Diese Zeitdehnung wird allerdings durch den Einfluss der Allgemeinen Relativitätstheorie mehr als ausgeglichen: Der Gang der Uhr erfolgt nämlich langsamer, je größer das Gravitationspotential am Ort der Uhr ist. Demzufolge laufen die Uhren am Erdboden deutlich langsamer als die Uhren in den Satelliten. Deshalb mussten die Atomuhren in den Satelliten verlangsamt werden.

Die GPS-Satelliten übertragen ihre Datensignale auf zwei Trägerfrequenzen im Mikrowellenbereich, die als L_1 (1575,42 MHz) und L_2 (1227,6 MHz) bezeichnet werden [7]. Die L_1-Frequenz trägt sowohl die Navigationsdaten als auch den SPS-Code (standard positioning code – Standard-Positionsbestimmungscode). Die L_2-Frequenz trägt nur den P-Code (Precision) und wird nur von Empfängern, die für den PPS (precision positioning code) vorgesehen sind, verwendet. Das PDGPS des Fächerecholotsystems ist ein Zweifrequenzgerät, welches beide Trägerwellen auswertet. Die hohe Präzision der Zeitmessung entsteht vor allem durch die Verwendung des P-Codes. Der P-Code ist ein ca. sieben Tage langer Pseudozufallscode. Dieser Code ist nur scheinbar zufällig und wiederholt sich regelmäßig. Er wird mit einer Phasenmodulation auf die Trägerwelle moduliert. Durch die Untersuchung der Phaseninformation des L_2-Signals kann die Bestimmung der Laufzeit noch genauer durchgeführt werden. Allerdings wird durch die Hinzunahme der Phaseninformation noch ein zusätzlicher Satellit für die Berechnung der Position des Empfängers benötigt. Diese Methode liefert eine Genauigkeit von 10–15 m.

Die verbliebene Ungenauigkeit resultiert aus realen Bahnfehlern der Satelliten, dem Einfluss der Atmosphäre auf den Weg des Signals und die Veränderungen der Geschwindigkeit des Signals in der Ionosphäre. Diese Veränderungen des Satellitensignals sind in einem Gebiet von mehreren 10.000 km² aber annähernd gleich groß, deshalb können sie mit Hilfe eines zweiten Empfängers korrigiert werden (RTK-Verfahren/ **R**eal **T**ime **K**inematic). Dieser zweite Empfänger wird an einem festen Ort positioniert, dessen geographische WGS84-Koordinaten sehr genau bekannt sind. Die Positionsdifferenz zwischen den bekannten Koordinaten und dem gerade ermittelten Messwert des festen Empfängers wird dann in Echtzeit über eine

Datenfunkstrecke an den mobilen Empfänger auf der PRANDTL weitergeleitet, welcher seine Positionsdaten damit korrigiert. Mit dem RTK-Verfahren sind Genauigkeiten von 0,02 m für die Horizontal- und 0,04 m für die Vertikalkomponente zu erreichen. Bei der Messkampagne über dem Klappfeld wurde die Referenzstation mit dem festen Empfänger auf dem Dach des DLRG-Hauses (**D**eutsche **L**ebens-**R**ettungs-**G**esellschaft e. V.) in Nienhagen aufgebaut (*siehe Abbildung 7*).



Position der Referenzstation in WGS84-Koordinaten:
Φ = 54°09’61,6048’’ nördliche Breite
λ = 11°56’41,8034’’ östliche Länge
h = 53,134 m.

Abbildung 7:
GPS-Referenzstation in Nienhagen.

2.2.2 Kreiselkompass

Um das Fächerecholot in Fahrtrichtung orientieren zu können, ist eine genaue Messung des Kurses notwendig. Der Schiffskurs wurde mit dem Kreiselkompass Anschütz 4 ermittelt (*siehe Abbildung 8*).
Dieser Kompass ist aus zwei schnell rotierenden Kreiseln aufgebaut, welche in einem Winkel von 90° zueinander ausgerichtet sind und sich nur in der Horizontalen bewegen können. Damit besteht das Gesamtsystem zusammen mit der Erde aus drei rotierenden Kreiseln.
Die Funktionsweise eines solchen Kompasses beruht auf dem Prinzip, dass sich zwei aufeinander rotierende Kreisel parallel zueinander ausrichten. Ein rotierender

Kreisel auf der Erde, dessen Achse sich in der Horizontalen frei bewegen, diese aber nicht verlassen kann, zeigt also immer auf den geographischen Nordpol.
Dabei soll die Verbindung von zwei im rechten Winkel zueinander ausgerichteten Kreiseln eine Präzession verhindern und eine Auslenkung durch äußere Einflüsse erschweren.

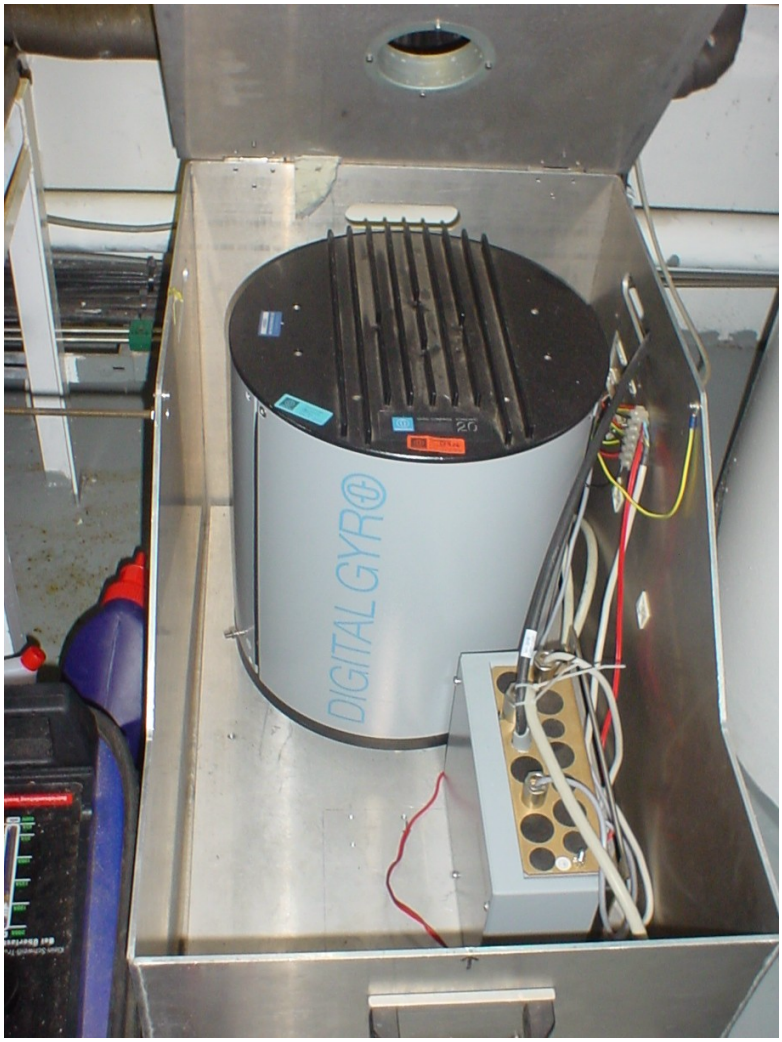


Abbildung 8:

Kreiselkompass Anschütz 4 des EM 3000 Fächerecho-lotsystems.

2.2.3 Bewegungssensor

Der Bewegungssensor (*siehe Abbildung 9*) gibt Hub, Rollen und Stampfen des Schiffes aus (*siehe Abbildung 10*). Er ist die sensibelste Komponente des Mess-systems. Mit seinen Daten wird die Ausrichtung des Fächerecholots korrigiert, so dass es seine Signale immer lotrecht zum Boden aussenden kann. Außerdem werden mit den Aufzeichnungen des Bewegungssensors die Bewegungen des Schiffes durch die Wellen korrigiert, damit diese nicht auf den Seebodenkarten erscheinen.



Abbildung 9: Bewegungssensoren an Bord der LUDWIG PRANDTL.

Schiffsbewegungen

Hub:	Aufwärts- und Abwärtsbewegung entlang der Z-Achse,
Rollen:	Rotationsbewegung entlang der X-Achse,
Stampfen:	Rotationsbewegung entlang der Y-Achse.

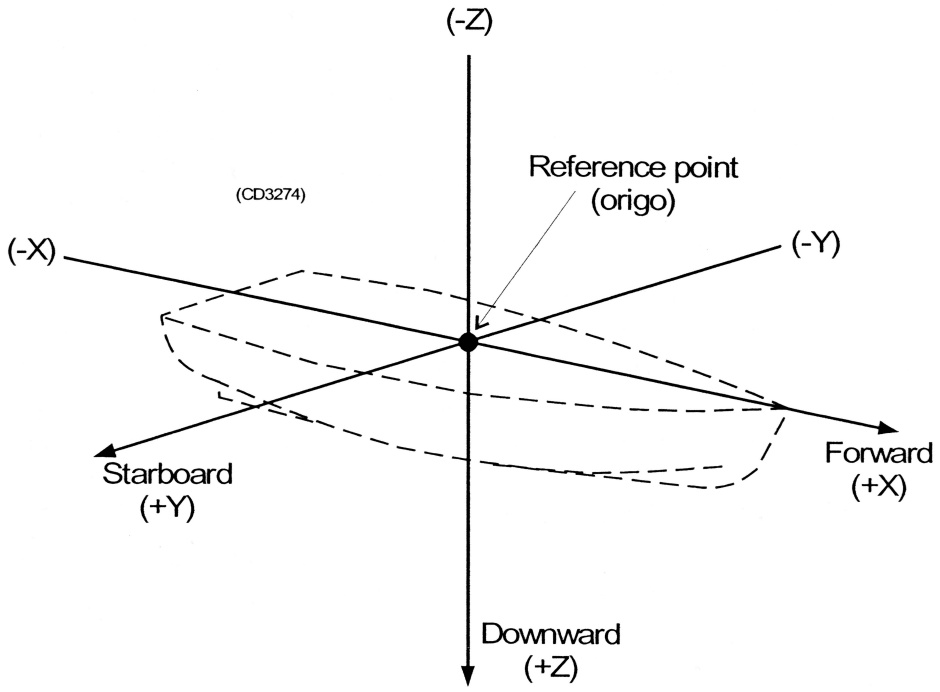


Abbildung 10: Koordinatensystem der Schiffsachsen [8].

Funktionsweise

Für die Messung der Hub-, Roll- und Stampfwerte arbeiten zwei separate Messsysteme nebeneinander.

Das erste System ermittelt nur die Stärke der Auslenkung, ohne Angaben über die Richtung zu machen. Dazu wurde eine Membran drehbar so angebracht, dass sie bei Schiffsbewegungen genau in Richtung der Auslenkung schwingt. Diese Membran ist an einem Kondensator befestigt. Bei Auslenkung erzeugt der Kondensator ein Signal, welches über einen Verstärker an einen Elektromagneten weitergeleitet wird, der die Membran wieder in ihre Ausgangslage zurück führen soll. Der dazu benötigte Strom ist proportional zur Beschleunigung der Membran.

Das zweite System misst die Richtung der Auslenkung. Dazu wird ein Kristallzylinder mit einem Strom über mehrere Elektroden in Schwingungen versetzt. Im Ruhezustand des Bewegungssensors entstehen vier Schwingungsknoten, dabei ist die Stabilität der Schwingungsknoten abhängig von dem Strom, mit dem der Zylinder in Schwingungen versetzt wird. Bei der Bewegung des Schiffes wird auch die Lage der Schwingungsknoten verändert, dies ist nur bis zu einem Grenzwert möglich. Die Position der Schwingungsknoten wird abgegriffen und die Messdaten aus beiden Systemen werden zusammengefasst.

Der Strom zur Erzeugung der Schwingungsknoten auf dem Zylinder bestimmt die Trägheit des Bewegungssensors. Diese muss auf die äußeren Gegebenheiten der Messumgebung abgestimmt werden, damit der Bewegungssensor nicht zu schnell oder zu träge reagiert. Die Trägheit des Bewegungssensors wird vom Hersteller eingestellt.

Nach der Korrektur der Erdrotation und der Zentripetalkraft bei Kurvenfahrten erhält man die endgültigen Bewegungen des Schiffes [9].
Die Genauigkeit des Bewegungssensors liegt in z-Richtung bei 0,01 m bis 0,05 m und in x- und y-Richtung bei 0,01 m bis 0,04 m.

2.2.4 Fächerecholot

Bei Echolotvermessungen sendet ein Schwinger ein Signal im Ultraschallfrequenzbereich (20 kHz bis 1000 MHz) aus. Die Schallwellen werden am Gewässerboden

reflektiert und ein Empfänger misst die Laufzeit des Signals durch die Wassersäule. Aus der Laufzeit und der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals wird dann die Tiefe ermittelt.

Für die Vermessung von Gewässersohlen, Flussmündungen, Flachküsten und auf dem Meer werden statt Echoloten mit Einzelstrahl so genannte Fächerlotsysteme eingesetzt. Dabei werden mehrere Signale gleichzeitig in Form eines Fächers quer zur Fahrtrichtung ausgesendet (*siehe Abbildung 11*) und die Laufzeiten mehrerer reflektierter Signale gemessen. Auf diese Weise wird nicht nur eine Profillinie gemessen, sondern ein ganzer Streifen eines Gebietes aufgenommen. So kann eine flächendichte Vermessung durchgeführt werden, bei der Interpolationen zwischen den einzelnen Profillinien nicht mehr nötig sind. Dadurch wird die Vermessung ökonomischer und bei mehrfacher Überdeckung der gemessenen Streifen gut kontrollierbar.

Bei der Vermessung des Verklappungsgebietes kam ein SIMRAD EM 3000 Fächerecholot zum Einsatz. Dieses sendet mit einer Pingrate von maximal 15 Hz Signale mit einer Frequenz von 300 kHz aus. Nach Angaben des Herstellers kann es bei Wassertiefen bis zu 150 m eingesetzt werden [9].

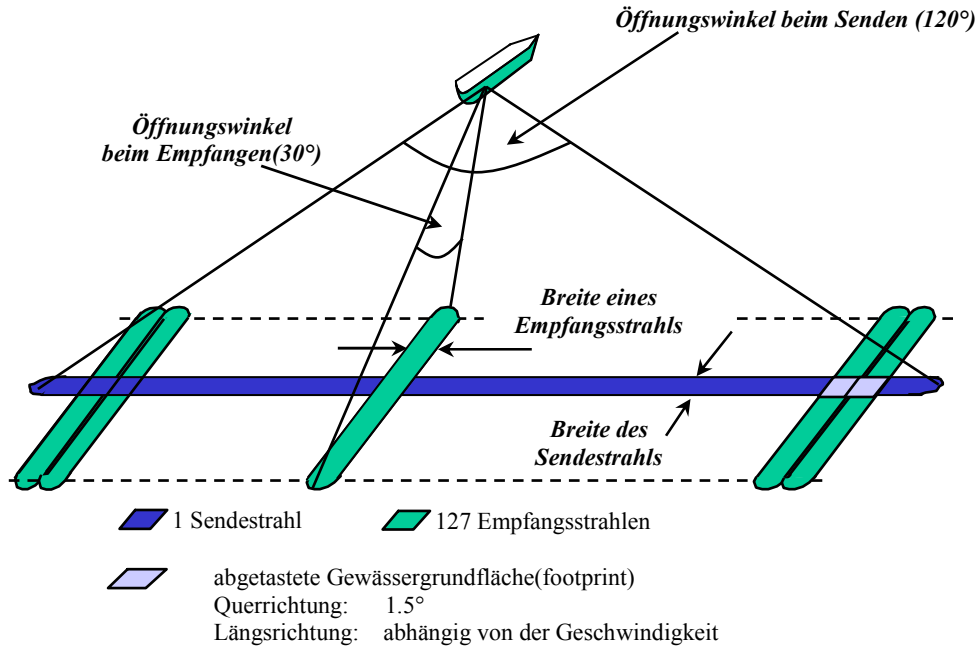


Abbildung 11: Sende- und Empfangswinkel [10] bei der *Fächerecholotmessung.*

Im Regelfall entspricht das erste empfangene Echo der gesuchten Laufzeit des Signals in der jeweiligen Richtung. Um jedoch Reflektionen aus der angrenzenden Umgebung ausschließen zu können, wird der Winkel des Sendesignals in Fahrtrichtung möglichst gering gehalten. Dies geschieht durch die Anwendung einer Mills-Cross-Konfiguration [10]. Bei der Mills-Cross-Konfiguration sind Sende- und Empfängerarray senkrecht zueinander ausgerichtet. Bei dem verwendeten Fächerecholotschwinger wurden die Arrays in L-Form aufgebaut, wobei das Sendearray in Fahrtrichtung weist und das Empfängerarray quer zur Fahrtrichtung aufgebaut ist.

Das Sendesignal erhält seine Fächerform durch das Zusammenwirken von mehreren piezoelektrischen Sendeelementen. Ähnlich dem Doppelspaltexperiment, entsteht durch die Überlagerungen der Wellen verschiedener Signalquellen durch Auslöschung und Verstärkung ein Interferenzmuster. Dabei sind die Interferenzstreifen senkrecht zum Sendearray ausgerichtet und das Maximum nullter Ordnung entspricht dem Sendefächer. Man erhält ein akustisches Signal, dessen Fächerwinkel 120° quer und 1,5° längs zur Fahrtrichtung beträgt [11].
Beim Fächerecholot wird nun statt mit zwei Öffnungen mit mehreren Sendern ein Beugungsmuster erzeugt. Durch eine zeitlich verzögerte Ansteuerung der einzelnen Sendeelemente (Beamforming) wird erreicht, dass die äußeren Nebenmaxima eine so geringe Intensität haben, dass sie vernachlässigt werden können.

Das Empfangsarray ist aus 80 Einzelempfängern aufgebaut. Um die reflektierten Signale während der Fahrt und trotz Stampfen des Schiffes empfangen zu können, entspricht der Empfangswinkel längs zur Fahrtrichtung 30°.

Im Seismogramm (*siehe Abbildung 12*) sind die empfangenen Signale an den 80 Empfängern dargestellt. Die Entfernung (Range(m)) gibt dabei den von den Signalen zurückgelegten Weg in Metern, die Farbskala gibt die Amplitude in Volt an. Die reflektierten Signale sind im Seismogramm als gelbe Streifen zu erkennen.

Reflektierte Signale aus der Fächermitte erreichen die Empfänger im Allgemeinen früher als reflektierte Signale aus dem Außenbereich des Fächers, da sie eine kürzere Strecke zurücklegen mussten. Signale aus verschiedenen Richtungen überlaufen auch das Empfängerarray aus verschiedenen Richtungen, wodurch ein geringfügiger Anstieg im Seismogramm entsteht. Durch eine Kombination dieser Informationen des Seismogramms werden dann die Laufzeiten von 127 Einzelstrahlen von einander unterschieden und berechnet, dabei wird – abhängig von der Intensität des reflektierten Signals – Amplituden- oder Phasenmessung verwendet.

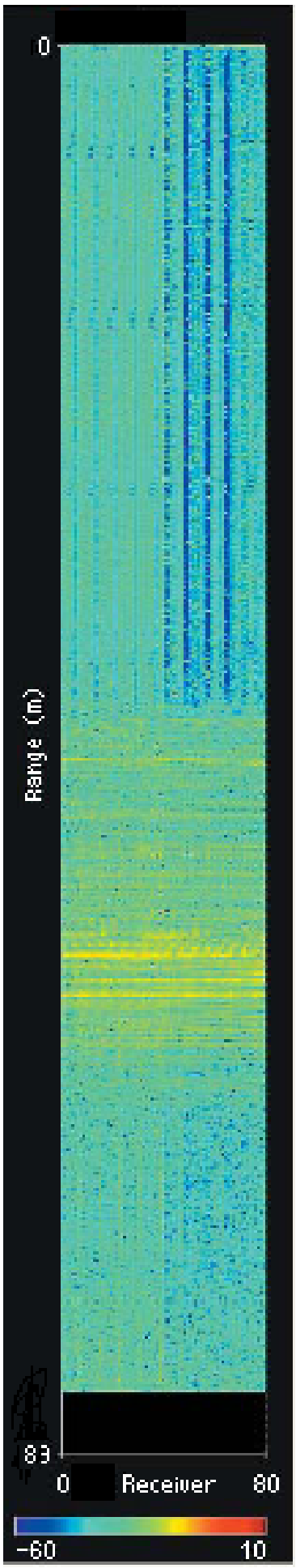


Abbildung 12:
Seismogramm der empfangenen Signale [9]

Abhängig von der Intensität des rückgestreuten Signals wird die Laufzeit durch Amplituden- oder Phasenmessung ermittelt. Erreicht die Intensität des reflektierten Signals einen festgelegten Grenzwert, wird eine Amplitudenmessung durchgeführt, liegt die Stärke des Signals unter diesem Grenzwert kommt die Phasenmessung zur Anwendung.

Bei der Amplitudenmessung wird nur das Maximum des Signals zur Messung der Laufzeit betrachtet. Deshalb kann diese Methode nur dann zur Tiefenbestimmung verwendet werden, wenn es sich um einen sehr scharfen Peak handelt. Die Genauigkeit der Tiefenbestimmung durch eine Amplitudenmessung liegt bei 0,1 m [5]. Die Amplitudenmessung wird aber nur bei den Mittelstrahlen des Fächers eingesetzt, bei denen die Intensität des rückgestreuten Signals sehr hoch ist. Bei diesen Strahlen liegt die Genauigkeit der Tiefenbestimmung bei wenigen Zentimetern [5].

Die Phasenmessung nutzt zur Bestimmung der Tiefen auch die Phaseninformationen der rückgestreuten Signale. Bei der Reflexion eines Strahls an einem Medium entsteht ein Phasensprung. Dadurch entsteht eine winkelabhängige Phasenverschiebung zwischen Strahlen an den Fächerrändern und dem Mittelstrahl.
Die Phasenmessung wird vor allem bei Signalen mit einer sehr schwachen Intensität verwendet. Dabei wird die aus dem Seismogramm bestimmte Laufzeit mit Hilfe der Phasenverschiebung präzisiert. Die Genauigkeit der Tiefenbestimmung mittels Phasenmessung liegt bei 0,05–

0,07 m [5] und ist damit genauer als die Amplituden-messung. Sie kann aber bei den Mittelstrahlen des Fächers nicht zur Anwendung kommen, da die Phasenverschiebung mit abnehmendem Fächerwinkel (Mittelstrahl 0°) kleiner wird.

Vor der Berechnung der Tiefen aus den gemessenen Laufzeiten muss der Laufweg des Signals bestimmt werden, da sich die akustische Signalwelle aufgrund von Beugungseffekten nicht geradlinig ausbreitet. Dazu muss die Schallgeschwindigkeit in unterschiedlichen Wassertiefen bestimmt werden.

2.2.5 Wasserschallsonde

Die Schallgeschwindigkeit im Wasser hängt von Temperatur und Salzgehalt ab. Sie berechnet sich nach der Gleichung [12]:

$$c = 1449{,}2 + 4{,}6T^2 - 0{,}00029T^3 + (1{,}34 - 0{,}01T)(S - 35) + 0{,}016z$$

c: Schallgeschwindigkeit
S: Salzgehalt
T: Temperatur
z: Druck.

Zwischen Wasserschichten mit unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten kommt es zu Schallrefraktionen, der Strahl wird von seiner ursprünglich geradlinigen Ausbreitung abgelenkt. Um diese Effekte zu korrigieren, ist es notwendig den genauen Verlauf des Strahls zu kennen. Durch eine Messung der Wasserschallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tiefe (*siehe Abbildung 13)* kann der Weg des Strahls rekonstruiert werden um so die Tiefen aus den Laufzeiten zu berechnen.

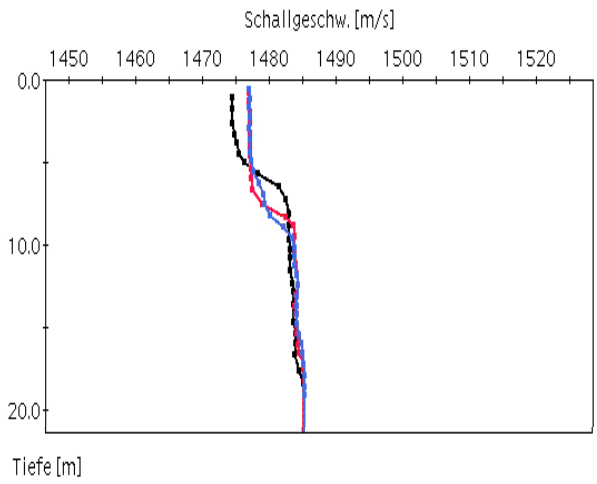


Abbildung 13: Wasserschallprofile im Untersuchungsgebiet vom 14. bis 16. Oktober 2003.

Bei allen Messungen war in einer Tiefe von 5 bis 10 m eine Sprungschicht im Schallprofil zu erkennen. Diese Sprungschicht des Wasserschallprofils entsteht durch eine Schichtung von Wasser mit unterschiedlichem Druck und Salzgehalt, welche typisch für die Ostsee ist [13]:

Da mittlere Verdunstung und mittlerer Niederschlag für die gesamte Ostsee etwa gleich groß sind, erfolgt nur durch die Wasserzufuhr aus Flüssen eine Vergrößerung des Wasservolumens. Deshalb steigt der Wasserstand der Ostsee in östlicher Richtung an. Durch das Oberflächengefälle entsteht ein Druckgefälle, welches im Mittel einen Ausstrom von Ostseewasser in Richtung Kattegat bewirkt. Gleichzeitig wird die Ostsee durch die Zufuhr von Flusswasser ausgesüßt.

Ein niedrigerer Salzgehalt ist bei gleicher Temperatur gleichbedeutend mit geringerer Dichte. Die mittlere Dichte der Ostsee ist also kleiner als die mittlere Dichte im Kattegat. Durch die Dichtunterschiede von Kattegat und Ostsee bildet sich ein weiteres Druckgefälle aus, welches eine Strömung vom Kattegat in die Ostsee bewirkt (*siehe Abbildung 14*).

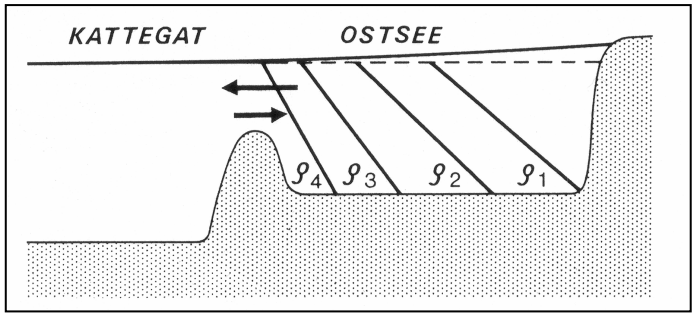


Abbildung 14:
Dichtegefälle zwischen Ostsee und Kattegat (aus [13]).

Berücksichtigt man sowohl das Druckgefälle durch die Oberflächenneigung als auch das Druckgefälle durch die Dichteunterschiede, so folgt: schweres salzreiches Wasser aus dem Kattegat schiebt sich unter das leichte Wasser der Ostsee und leichtes Ostseewasser bewegt sich in Oberflächennähe in den Kattegat. Dadurch entsteht eine Salzgehalt- und Druckschichtung, welche eine Sprungschicht im Wasserschallprofil zur Folge hat.

Die Stärke von Zu- und Ausstrom hängt von Niederschlägen und Windverhältnissen im Nord- und Ostseegebiet ab. Außerdem wirken in der Ostsee kaum Gezeiten, deshalb ändert sich die Schichtung des Ostseewassers nur allmählich und die Aufnahme eines Wasserschallprofils ist bei gleichbleibenden Wetterverhältnissen nur ein- bis zweimal am Tag nötig.

Zur Aufnahme des Wasserschallprofils wurde der Sound Velocity Smart Sensor (*siehe Abbildung 15*) der Firma Applied Microsystems LTD. eingesetzt. Dieser misst die Wasserschallgeschwindigkeit direkt und nicht über Umwege durch eine Messung des Salzgehaltes, der Temperatur und des Drucks im Wasser. Der Sensor sendet ein Schallsignal aus, welches an einem 10 cm entfernten Reflektor reflektiert wird. Da über eine so geringe Distanz eine Schichtung des Wassers in der Ostsee vernachlässigt werden kann, ist es möglich, die Schallgeschwindigkeit direkt aus der Laufzeit zu ermitteln. Gleichzeitig misst ein Drucksensor die jeweilige Wassertiefe, in der sich die Schallsonde gerade befindet.

Die Genauigkeit der Sonde beträgt 0,05 m/s [2]. Bei einer Wassertiefe von ca. 18,50 m ergibt sich damit eine Genauigkeit von ca. ±0,0006 m für die Tiefenmessung des Mittelstrahls und ca. ±0,001 m für die Tiefenmessung des äußersten Randstrahls des Signalfächers.

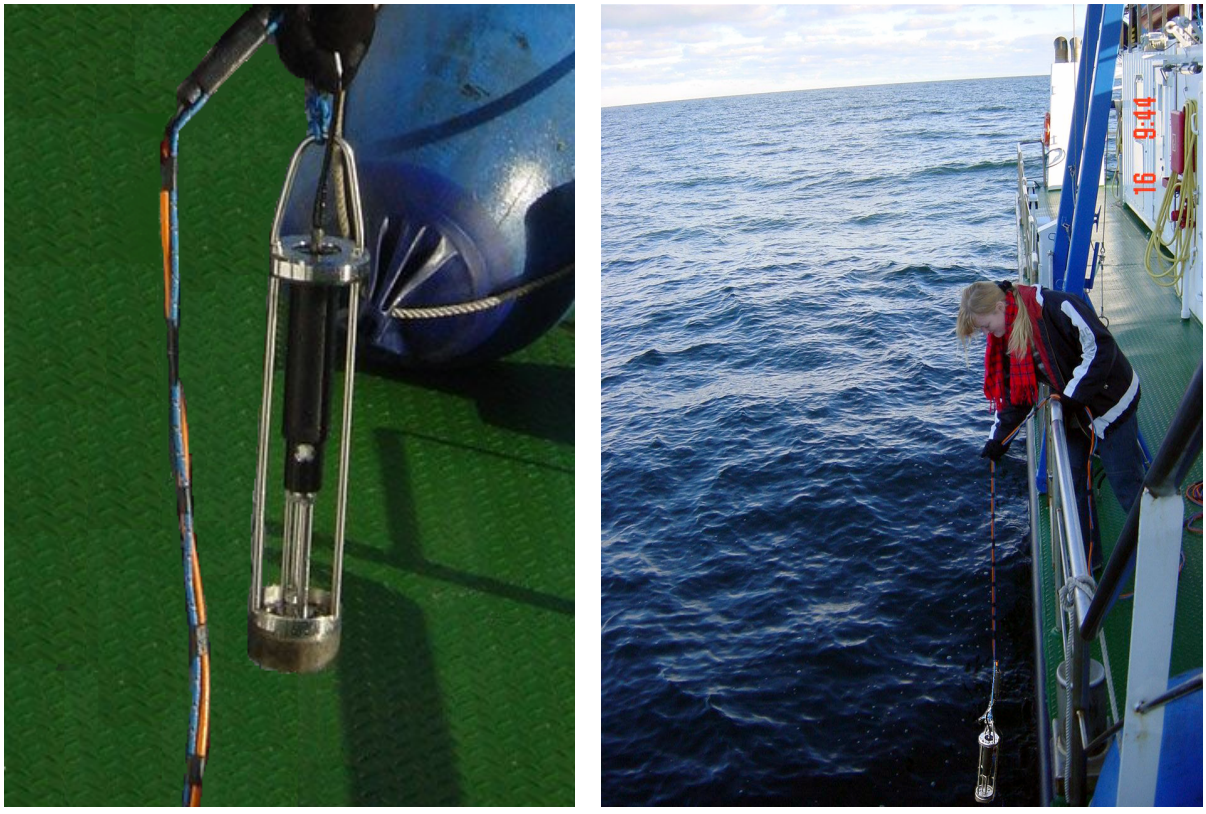


Abbildung 15: Wasserschallsonde.

2.3 Kalibrierung des Messsystems

Wellenbewegungen und Kursänderungen des Schiffes werden von Bewegungssensor und Kreiselkompass gemessen und an das Fächerecholot weitergegeben, um dieses immer senkrecht zur Horizontalen auszurichten. Für die Kalibrierung des Kreiselkompasses (Anschütz 4) reicht ein einmaliger Abgleich mit dem Schiffskompass (*siehe Abbildung 16*) aus, da dieser bereits bei der Installation auf der LUDWIG PRANDTL kalibriert wurde.

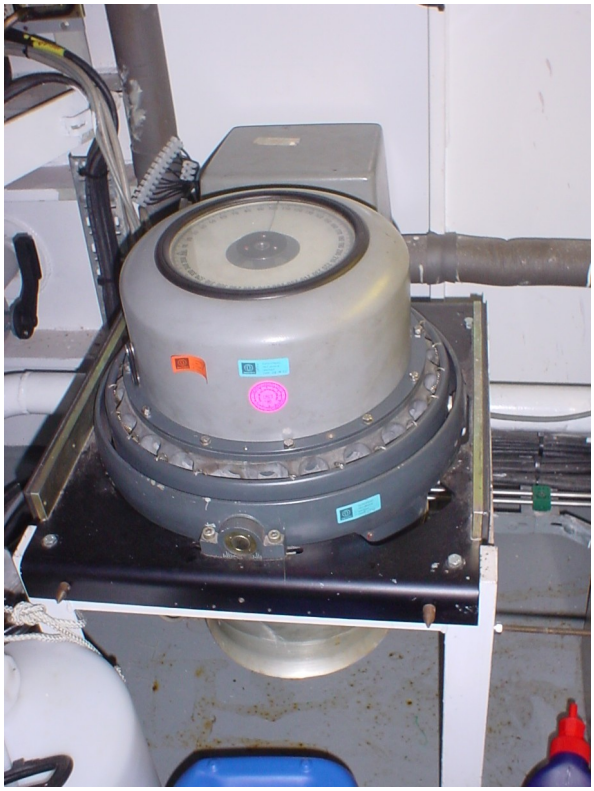


Abbildung 16: Schiffskreiselkompass.

Da der Bewegungssensor aber durch unterschiedliche Beladung des Schiffes nicht immer genau zu den Bewegungsachsen ausgerichtet ist, muss eine Kalibrierung durchgeführt werden.

Bei der Stampfkalibrierung wird der Winkel ermittelt, um den der Bewegungssensor von der tatsächlichen Vorwärtsachse (X-Achse) abweicht (Stampfwinkel).

Bei der Rollkalibrierung wird der Winkel zur Querachse (Y-Achse) des Schiffes ermittelt (Rollwinkel).

2.3.1 Stampfkalibrierung

Dadurch, dass der Bewegungssensor durch unterschiedliche Beladung des Schiffes nicht immer zu den Bewegungsachsen ausgerichtet ist, zeigt er ohne Kalibrierung einen fehlerhaften Stampfwinkel an. Mit einem fehlerhaften Stampfwinkel entsteht eine Positionsverschiebung der Fächerecholotspur in Fahrtrichtung. Der Seeboden sollte einen markanten Punkt oder einen Anstieg aufweisen, damit Unterschiede gut erkennbar sind. Nach zweimaligem Überfahren einer Messlinie aus verschiedenen Richtungen erhält man zwei Bilder, welche um das Doppelte der tatsächlichen

Positionsverschiebung gegeneinander verschoben sind. Durch trigonometrische Betrachtungen der abweichenden Position des markanten Punktes und den Tiefenmessungen kann der Stampfwinkel bestimmt werden (*siehe Abbildung 17*).

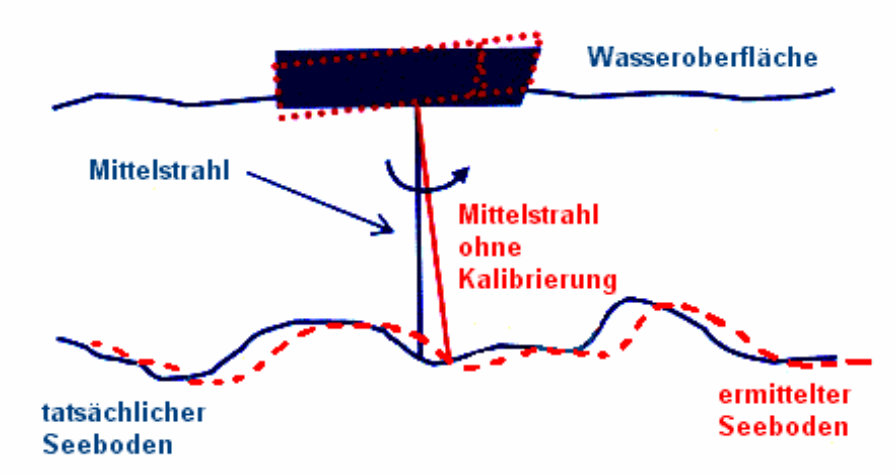


Abbildung 17: Prinzip der Stampfkalibrierung.

Der bei der Kalibrierung ermittelte Stampfwinkel wird bereits beim Aussenden der Signale berücksichtigt, um eine lotrechte Ausrichtung des Fächerecholotschwingers zu gewährleisten.

2.3.2 Rollkalibrierung

Auch um den Rollwinkel zu berechnen wird eine doppelt überfahrene Messlinie benötig. Durch die Rollwinkelabweichung entsteht eine Positionsverschiebung des Fächers quer zur Fahrtrichtung. Um den genauen Betrag der Verschiebung zu ermitteln ist es hier allerdings günstiger einen möglichst ebenen Untergrund auszuwählen. Die Hälfte des Winkels, um den die beiden Fächer insgesamt voneinander abweichen, entspricht dem Rollwinkel (*siehe Abbildung 18*).

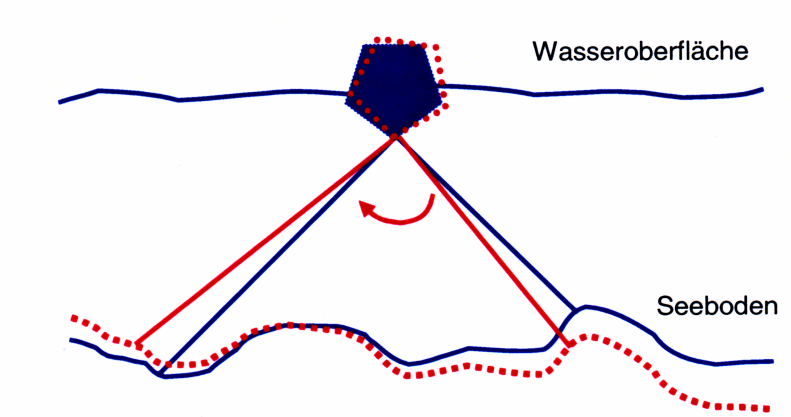


Abbildung 18: Prinzip der Rollkalibrierung.

2.4 Datenaufnahme und -bearbeitung

Die Datenaufnahme und -bearbeitung erfolgte mit den Programmen Merlin© und Neptune© von der Firma Simrad, CFloor© von der Firma Roxar und MorphDyn von der Firma V2T.
Im Rahmen dieser Diplomarbeit erfolgte nur die Datenauswertung mit CFloor© und MorphDyn, da die erste Datenbereinigung mit dem Programm Neptune© bereits durchgeführt wurde.

2.4.1 Merlin©

Merlin© [5] ist die Datenerfassungssoftware für das Fächerecholotsystem der Firma Simrad. Während einer Datenaufnahme werden hier die Messdaten aller Einzelkomponenten aufgezeichnet und mittels Zeitmarken synchronisiert. Außerdem werden erste Korrekturen durchgeführt, wie die Ermittelung der Laufzeit mit Hilfe des Wasserschallprofils und eine genauere Ortsbestimmung durch Einbeziehung der Winkel, welche bei der Kalibrierung des Bewegungssensors ermittelt wurden.
Zusätzlich wird der Benutzer durch ein optisches und akustisches Alarmsystem informiert, wenn ein Teil der Messung nicht ordnungsgemäß abläuft oder externe Daten nicht zur Verfügung gestellt werden können. Außerdem können auch schon erste Karten des Seebodens erstellt werden.

2.4.2 Neptune©

Das Programm Neptune© [8] dient der Bereinigung und Nachbearbeitung der Rohdaten. Dabei werden die Positionsdaten und die Tiefenwerte zunächst noch getrennt untersucht.

Zuerst werden die Daten auf ihre *Plausibilität* überprüft um grobe Fehler bei der Datenerhebung ausschließen zu können.
Weiterhin werden sogenannte *Tidekorrekturen* durchgeführt, um tide- oder windstaubedingte Wasserstandsschwankungen zu korrigieren. Die Korrektur erfolgt über die Höhenmessung des PDGPS. Nach der Korrektur sind alle Tiefenwerte auf NN (Normal Null, Amsterdamer Pegel) bezogen.

Zuletzt müssen Positionsdaten und Tiefenwerte noch miteinander in Verbindung

gebracht werden. Ergebnis der Bearbeitung sind dreidimensionale Koordinaten im WGS84-Format.

Nach der Datenbereinigung werden die Ergebnisse in einem Ascii- oder Simrad-Binärformat exportiert, welches für eine Weiterverarbeitung in CFloor© notwendig ist.

2.4.3 CFloor©

CFloor© [14] ist ein Modellierungs- und Kartographieprogramm, welches verschiedene kartographische Aufgaben in der Hydrographie bearbeiten kann, wie zum Beispiel Methoden zur Berechnung eines Geländemodells und die Darstellung der Karten mit verschiedenen Projektionsmethoden.

Zunächst werden die ungleichmäßig verteilten Tiefendaten der Messung in einem regelmäßigen quadratischen Gitter dargestellt oder in einer Triangulation (Dreiecksbildung) direkt miteinander verbunden.

Die vier wichtigsten Algorithmen zur Modellbildung von Cfloor© sind:

- das Maskierungsverfahren (Mask Method),
- das Snapping,
- das TIN-Verfahren (Triangulated Irregular Network),
- der Seebodenalgorithmus (Seabed Algorithm).

Die Methodik der vier Verfahren wird in Kapitel 2.5 beschrieben.

2.4.4 MorphDyn©

MorphDyn© ist ein Bildverarbeitungsprogramm der Firma V2T. Es wurde speziell zur Vermessung und Charakterisierung von periodischen Strukturen entwickelt, kann aber auch zur Untersuchung von morphologischen Strukturen angewendet werden. Wenn eine zeitliche Abfolge von Bildern existiert, kann mit den Bildverarbeitungsanalysen des Programms MorphDyn© auch die Dynamik der Bildstrukturen untersucht werden.

Eingesetzte Verfahren sind dabei:

- die Berechnung von statistischen Parametern zur Charakterisierung der Bildstrukturen,
- die Untersuchung von Volumenveränderungen durch die Darstellung von Differenzbildern,
- die Untersuchung der Bewegungsrichtung mittels optischem Fluss oder Korrelationsmethoden.

Das Programm wurde in Matlab© geschrieben und ist modular aufgebaut, so dass der Quelltext schnell einsehbar ist. Neue Module und Erweiterungen können auf diese Weise leichter in MorphDyn© eingebunden werden. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden weitere Module eingefügt (s. Anhang C: Neue Module in MorphDyn©):

- ein Algorithmus zu Untersuchung der statistischen Parameter von Kraterstrukturen;
- einer Untersuchung von Volumenveränderungen in Abhängigkeit von der Tiefe, um genaue Aussagen darüber treffen zu können, wo Veränderungen stattgefunden haben;
- ein Verfahren zur Untersuchung der Oberfläche in Abhängigkeit von der Skalierungsgröße durch die Berechnung der Varianz der Laplace-Pyramide.

Die Verfahren sind im Einzelnen beschrieben in Kapitel 5.

2.5 Erstellung eines Geländemodells

Nach der Datenaufnahme mit dem Fächerecholotsystem liegen die Tiefenwerte der Seeboden zunächst noch ungleichmäßig verteilt vor. Um die Tiefendaten bezüglich Volumina, Oberfläche und Dynamik untersuchen zu können, müssen sie durch die Erstellung eines Geländemodells in ein regelmäßiges Gitter überführt werden.
Zur Erstellung des Modells sollte in Abhängigkeit von der Gittergröße des angestrebten Modells eine möglichst hohe Datendichte erreicht werden. Bei der Planung der Messkampagne müssen neben den messtechnischen jedoch auch finanzielle Faktoren berücksichtigt werden.
Die Geländemodellierung wurde mit den Geländemodellierungsalgorithmen des Programms CFloor© durchgeführt. Die vier wichtigsten Verfahren sind im Folgenden beschrieben [14], [15]:

Mask Method (Maskierungsverfahren)

Diese Methode wird vor allem bei der Herstellung von regulären rechtwinkligen Gittern aus Daten mit sehr variabler Punktdichte verwendet. Dabei wird eine Mischung aus lokaler und globaler Approximation verwendet. Die lokale Approximation ist die Annäherung der einzelnen Gitterpunkte durch eine gewichtete Mittelung der in der Nähe befindlichen Punkte. Die Wichtung erfolgt in Abhängigkeit von der Entfernung der Datenpunkte zum Gitterpunkt. Die globale Approximation wird bei Gitternetzpunkten mit geringer Datendichte verwendet. Hier wird eine Flächenfunktion an die Oberfläche angenähert, mit deren Hilfe fehlende Gitterpunkte berechnet werden können. Dieses Verfahren benötigt sehr lange Rechenzeiten.

Snapping

Das Snapping ist der schnellste Algorithmus um einen ungleichmäßig verteilten Satz an Datenpunkten in ein regelmäßiges rechtwinkliges Gitternetz umzuwandeln. Dabei wird für jeden originalen Datenpunkt eine bestimmte Anzahl von Gitterpunkten ausgewählt. Der Wert für jeden Punkt des Gitters ergibt sich aus dem gewichteten Mittel aller dem Gitterpunkt zugeordneten Daten. Auch hier erfolgt die Wichtung in Abhängigkeit vom Abstand der Punkte.

TIN – Triangulated Irregular Network

Bei der Triangulation findet eine Dreiecksvermaschung der Daten statt. Um zu gewährleisten, dass die Eckpunkte eines Einzeldreiecks möglichst dicht beieinander liegen, wurde die Triangulation nach Delaunay [15] verwendet. Die Grundlage dieser Methode ist eine Umkreisbedingung, nach welcher nur Dreiecke berücksichtigt werden, deren Umkreis keine oder nur wenige Punkte aus der Umgebung enthält. Im 3-dimensionalen Raum wird eine Umkugelbedingung verwendet.
Die Lösung des TIN-Verfahrens ist kein regelmäßiges Gitter. Es entsteht eine Oberfläche, welche nur aus Dreiecken aufgebaut ist. Der Vorteil ist, dass ein Geländemodell kaum von den Originaldaten abweicht. Der schwerwiegende Nachteil ist, dass viele weiterführende Untersuchungen mit einem Dreiecksgitter nicht durchführbar sind (z.B. Oberflächenadditionen, Interpolation, Glättung, Korrekturen u.s.w.).

Zur Anwendung kam der *Seabed Algorithm (Gewässerbodenalgorithmus)* aus zwei Gründen:

1. Dieses Verfahren eignet sich zur Berechnung von Geländemodellen aus sehr großen Punktmengen.
2. Der Benutzer hat bei dieser Methode sehr viele Möglichkeiten selbst Parameter einzustellen, so dass ein optimales Gleichgewicht zwischen Rechenzeit und Qualität des Geländemodells gefunden werden kann. Die Standartabweichungen des digitalen Geländemodells liegen bei ca. ±3 cm [8].

Im folgenden ist die Funktionsweise des *Seabed Algorithm* im Detail beschrieben:

Seabed Algorithm

Um den einzelnen Gitterknoten die richtigen Messwerte zuordnen zu können, wird jede Gitterzelle (quadratische Fläche mit dem Gitterknoten im Zentrum) in eine Anzahl von **Quadranten** und jeder Quadrant in einzelne **Sektoren** unterteilt (*siehe Abbildungen 19 und 20*). Dabei bestimmt das Quadrat der **Sortierauflösung** die Anzahl der Quadranten pro Gitterzelle, so dass jeder Gitterknoten von Quadranten und einer einstellbaren Anzahl von Sektoren umgeben ist (*siehe Abbildung 20*).

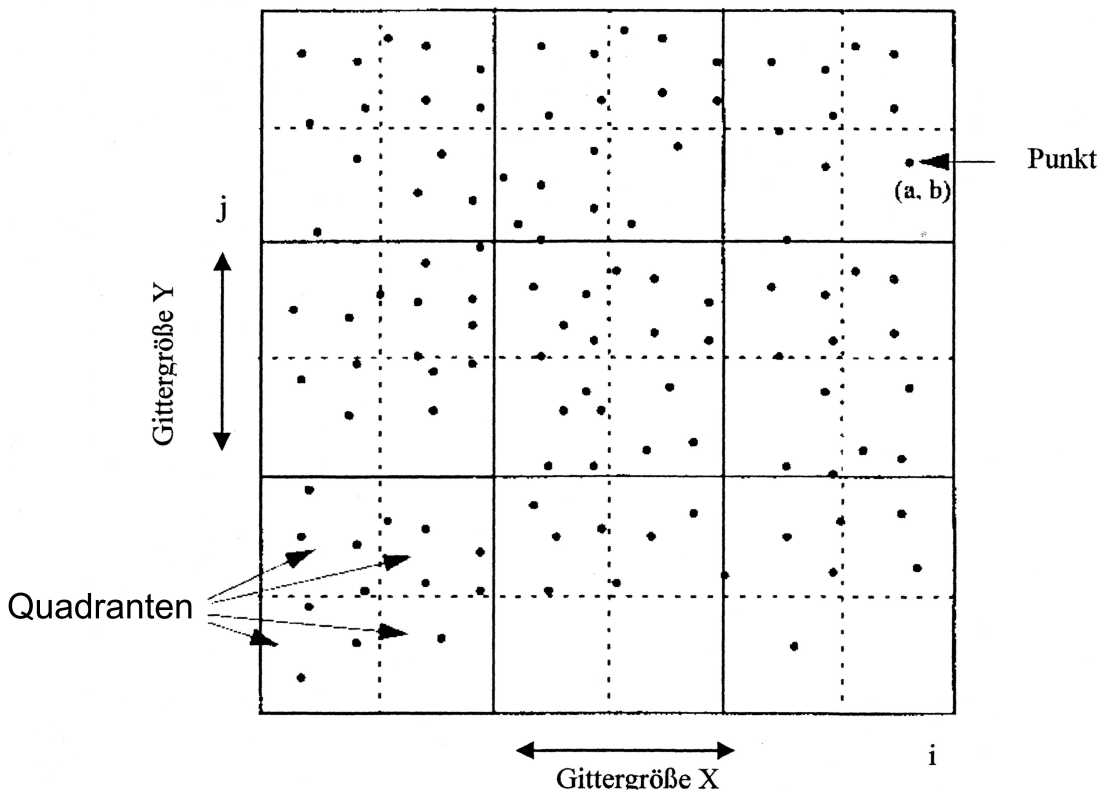


Abbildung 19: Seabed Algorithm: Unterteilung des Gitternetzes in je 4 Quadranten pro Gitterknoten [14].

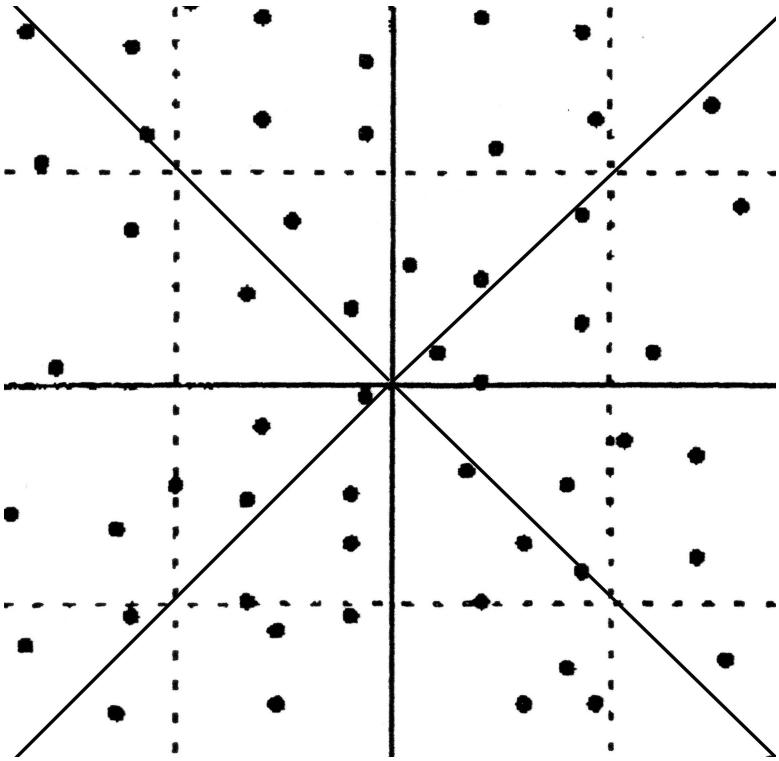


Abbildung 20: Sebed Algorithm: Unterteilung der Quadranten in je 2 Sektoren [14].

Des Weiteren wird eingestellt, wie viele Sektoren mindestens Daten enthalten müssen und wie viele Messwerte pro Quadrant mindestens vorhanden sein müssen, um den Gitterknotenpunkt zu berechnen. Auf diese Weise wird eine gleichmäßige Verteilung der verwendeten Messdaten um den Gitterknoten herum gewährleistet.
Mit einer Spiralsuche werden die für die Berechnung relevanten Punkte ausgewählt (*siehe Abbildung 21)*. Die Suche erfolgt in zwei Teilschritten mit **zwei unterschiedlichen Suchradien**. Im ersten Teilschritt erfolgt die Suche innerhalb des größeren Radius mit Ausschluss des kleineren Radius. Im zweiten Teilschritt werden die Datenpunkte innerhalb des kleinen Radius ausgewählt.
Durch die Anwendung einer Spiralsuche wird erreicht, dass zur Berechnung des Gitterpunktes die Messpunkte verwendet werden, die der Position des Gitterpunktes am nächsten sind.

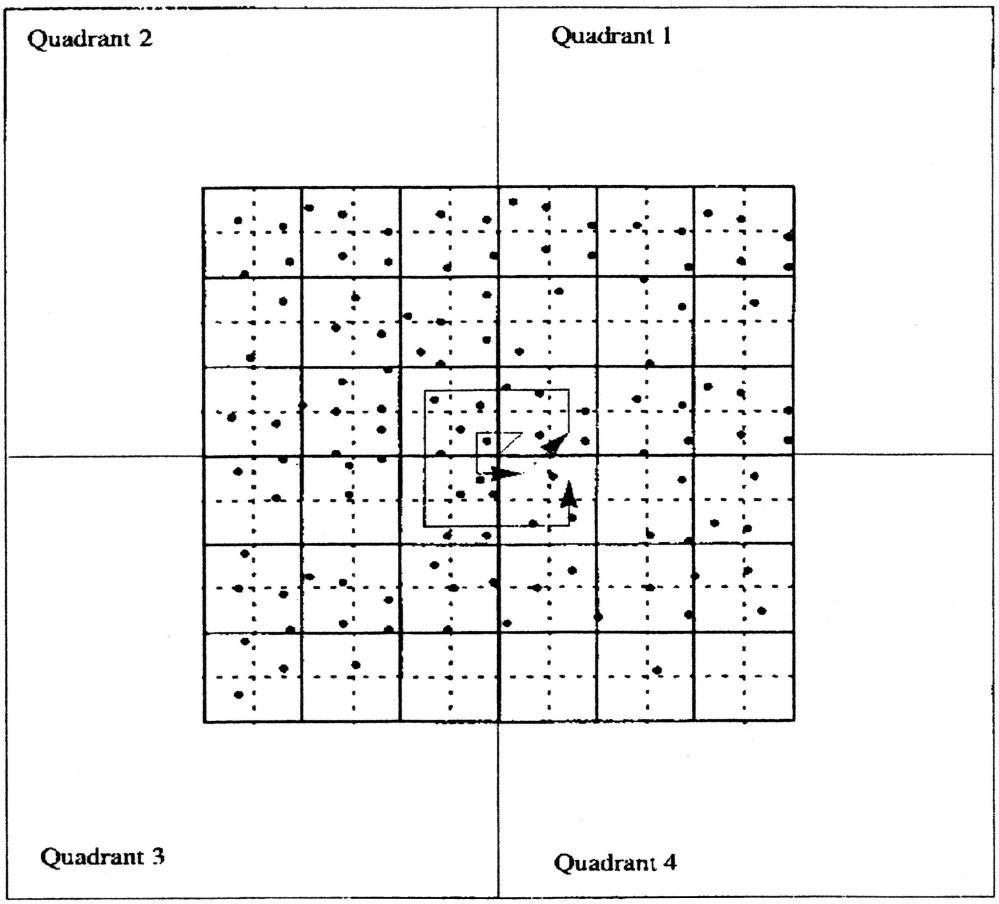


Abbildung 21: Spiralsuche beim Seabed Algorithm [14].

Wird in beiden Teilschritten die Mindestanzahl an Messwerten nicht erreicht, hat das Geländemodell eine Lücke, denn es wird kein Tiefenwert für den Knotenpunkt berechnet. Ist die notwendige Anzahl von Messwerten vorhanden, wird der Tiefenwert für den Knotenpunkt durch eine Mittelung berechnet, wobei die einzelnen

Messdatenpunkte in Abhängigkeit von Standardabweichung und Entfernung vom Gitterknotenpunkt gewichtet werden.

Die Wichtung der Standardabweichung erfolgt, indem vom Benutzer ein **Wichtungsfaktor** festgelegt wird. Messwerte mit der besten Qualität, also der geringsten horizontalen und vertikalen Standardabweichung, werden mit diesem Faktor versehen. Werte geringerer Qualität, d.h. mit größerer Standardabweichung, werden mit dementsprechend kleineren Wichtungsfaktoren belegt, gehen also mit einer geringeren Wichtung in die Rechnung ein.
Zusätzlich bestimmt ein **Mischfaktor**, in welchem Verhältnis Entfernungs- und Qualitätswichtung zu einander stehen. Die Gesamtwichtung eines Datenpunktes wird wie folgt ermittelt:

$$W = \frac{1}{(f_W + e)^n}$$

W: Gesamtwichtung

f_w: Wichtungsfaktor

e: Entfernung zum Gitterknotenpunkt

n: Mischfaktor.

Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Parameter beim „Seabed Algorithm“ sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Zur Weiterverarbeitung der Daten mittels Bildverarbeitungsmethoden in MorphDyn© und um geometrische Analysen durchführen zu können, werden die Daten in CFloor© von WGS84-Koordinaten in x-, y- und z-Koordinaten des Gauß-Krüger-Systems umgewandelt.

Tabelle 1: Verwendete Parameter bei der Geländemodellierung mit dem Seabed Alorithm des Programmes CFloor©.

Gittergröße und Suchradien	
Gittergröße	1 m
Suchradius	1 x Gittergröße
Sortierauflösung	2 (= 4 Quadranten pro Gitterzelle)
Grundeinstellung zu Datenvolumen und Datenverteilung	
Minimale Messwertanzahl	4
Minimale Sektorenanzahl mit Daten	2
Sektorenanzahl pro Quadrant	1
Minimale Messwertanzahl pro Sektor	2
Maximale Messwertanzahl pro Sektor	8
Wichtungseinstellungen	
Wichtungsfaktor	2
Mischfaktor	0,5

3 Planung und Durchführung der Messkampagnen

3.1 Planung der Messung

Um ein Geländemodell mit ausreichender Genauigkeit bei hoher räumlicher Auflösung zu erhalten, muss eine möglichst hohe Messpunktdichte erreicht werden. Gleichzeitig muss darauf geachtet werden, dass die Messungen zeitlich durchführbar sind und wirtschaftlich bleiben.

Die Dichte der Messpunkte ist abhängig von den Parametern des Fächerecholots (Pingrate, Anzahl der gemessenen Tiefenwerte pro Zeiteinheit, Öffnungswinkel des Fächers), der Wassertiefe, der Geschwindigkeit des Messschiffs und der Häufigkeit, mit der das Gebiet überfahren wird (Überdeckung).

Bei einem Öffnungswinkel des Fächers von 120° und der vorliegenden Wassertiefe von 18,5 m wird am Seeboden ein Gebiet von 64 m Breite überstrichen. Um die Daten leichter vergleichen und kontrollieren zu können, sollten die Schiffslinien einen Abstand von mindestens einer halben Fächerbreite haben, damit jedes Gebiet zweimal in derselben Ausrichtung überfahren wird. Empfehlenswert ist, das Gebiet noch einmal in einem Winkel von 90° zu überfahren, da an den Rändern des Fächers durch Schallschatten (*siehe Abbildung 22*) Datenlöcher entstehen können.

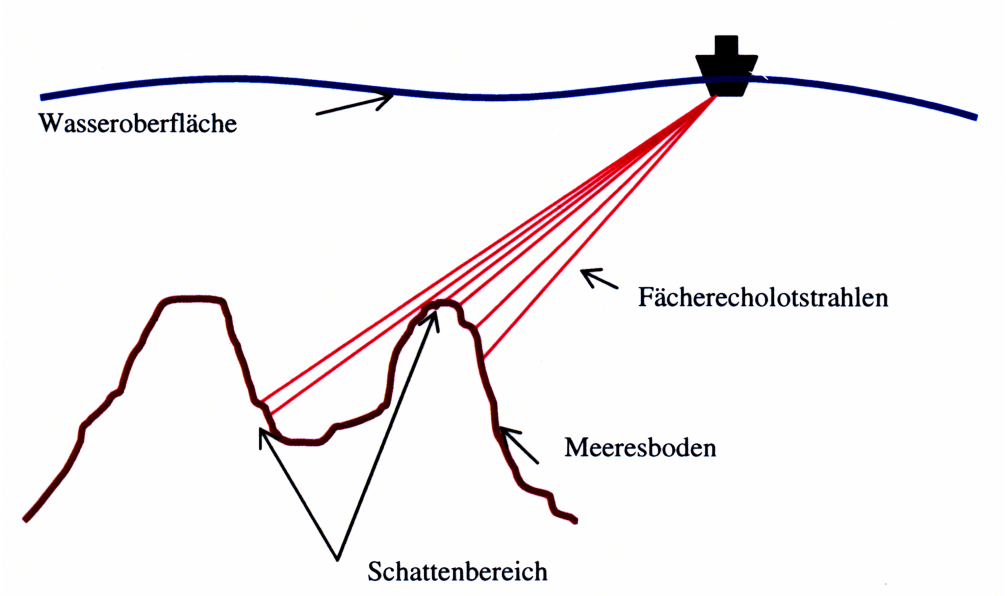


Abbildung 22: Skizze des Schallschattens.

Allerdings sind die Seitenwinkel bei den vorliegenden Verklappungsstrukturen so

gering, dass eine negative Beeinflussung der Messung durch Schallschatten nahezu ausgeschlossen werden kann (*siehe Abbildung 23*).

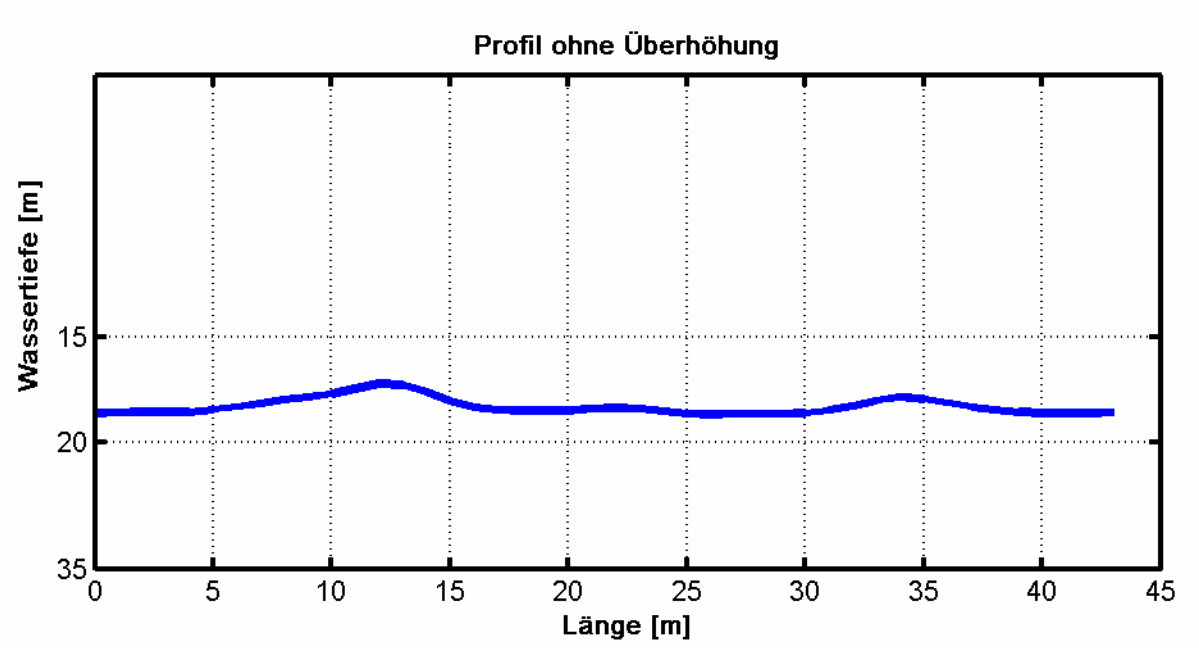


Abbildung 23: Profil über Mergelstrukturen ohne Überhöhung, August 2001.

Bei der Vermessung der Verklappungsstrukturen wurde angestrebt, das 900 m x 900 m große Gebiet einmal in Ost- bzw. West- und einmal in Nord- bzw. Süd-Richtung mit einem Schifflinienabstand von 32 m zu überfahren. Da der Fächer des Echolots ca. 64 m breit ist, wird dabei jede Fläche viermal mit dem Fächer überstrichen, das heisst, die Vermessung wird mit einer Überdeckung von 400 % durchgeführt (*siehe Abbildung 24*).

Die Messdaten der Ost-/ Westvermessung (WO-Linien) und die Daten der Nord-/ Südvermessung (NS-Linien) sollten dann gemeinsam in das Geländemodell einfließen. Sie können aber auch getrennt voneinander betrachtet werden.

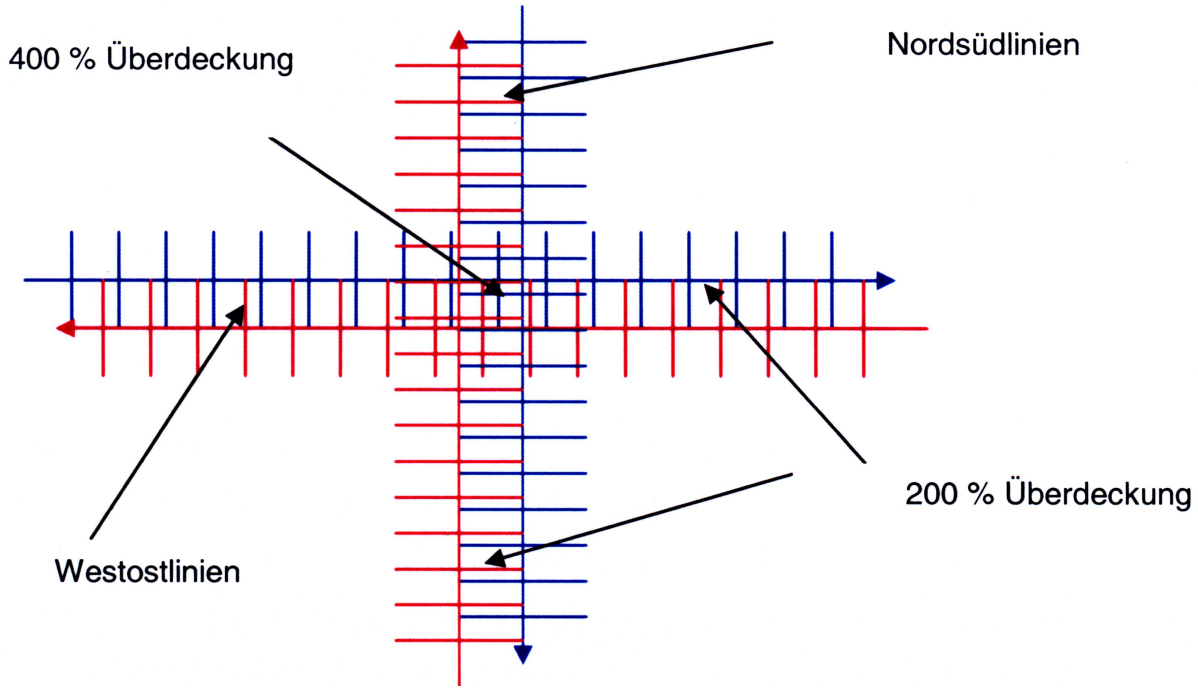


Abbildung 24: Überdeckung der Schiffslinien.

Die Anzahl der Messpunkte pro m² errechnet sich nach folgender Formel (Herleitung siehe ANHANG A):

$$D = \frac{550u}{vT}$$

u : Überdeckung (=1,2,3,...)

T : Wassertiefe

v : Schiffsgeschwindigkeit

Da die PRANDTL mit einer Geschwindigkeit von 5–10 Knoten (≈2,5–5 m/s) fuhr, ergibt sich eine Datendichte D von 25–50 Punkten pro Quadratmeter bei 400 % Überdeckung.

Bei der Messung im Oktober 2003 wurde über den Klappstellen der Abstand der Schiffslinien halbiert und es wurden sternförmig zusätzliche Linien gefahren (*siehe Abbildung 25*), so dass sich dort eine Überdeckung von mehr als 800 % ergab. Das entspricht einer Datendichte von ca. 50–100 Punkten pro Quadratmeter.

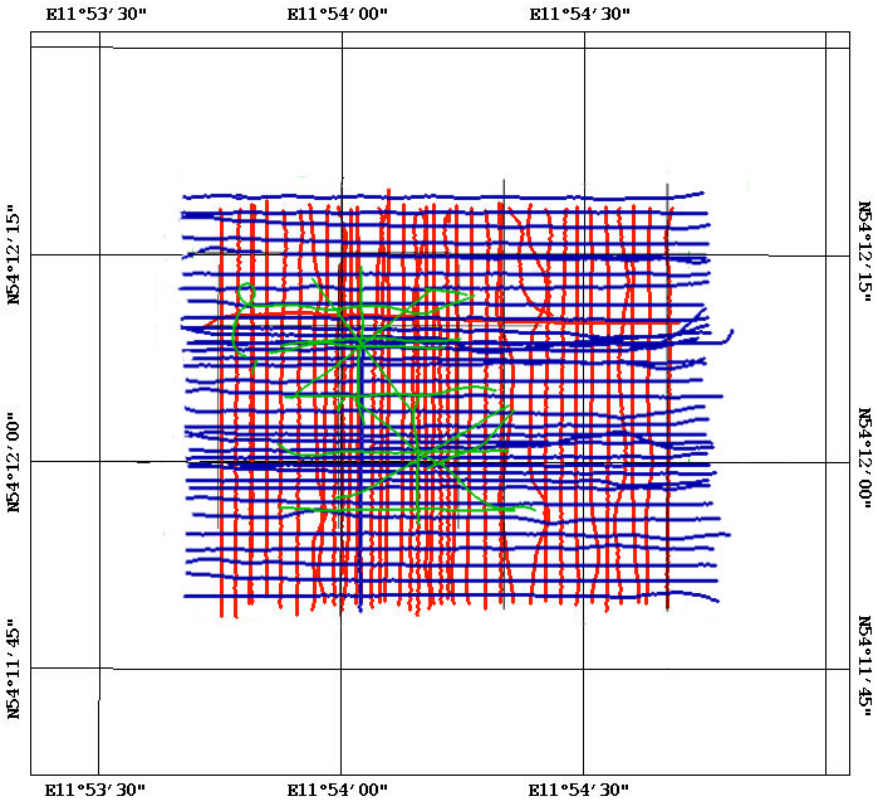


Abbildung 25: Schiffslinien bei der Messung im Oktober 2003.

3.2 Systemkonfigurationen an Bord der LUDWIG PRANDTL

Das Forschungsschiff LUDWIG PRANDTL wird vor allem in Nord- und Ostsee, Flussmündungsgebieten und Boddengewässern eingesetzt, deshalb darf das Schiff nur einen sehr geringen Tiefgang haben (max. 1,7 m). Eine spezielle Konstruktion des Schiffsbodens macht zusätzlich ein Trockenfallen in tidebeeinflussten Gewässern möglich. Aufgrund der besonderen Form des Schiffsbodens reagiert die LUDWIG PRANDTL stärker auf Wellenbewegungen als andere Schiffe. Deshalb musste nach den ersten Vermessungen im Juni 2001 der Bewegungssensor neu konfiguriert werden, da er für das Forschungsschiff zu träge eingestellt war.

Zwischen Juni 2001 und Oktober 2003 wurden insgesamt fünf Messfahrten durchgeführt. Während Kreiselkompass und Bewegungssensor bei diesen Messfahrten immer im Zentrum des Schiffes installiert waren, um die Auslenkungen möglichst gering zu halten, waren GPS-Antenne und Fächerecholotschwinger nicht immer an der selben Stelle des Schiffes installiert.

Bei den Messkampagnen im Juni und August 2001 waren Fächerecholotschwinger und GPS-Antenne zentrisch übereinander am Bug (vorne) des Schiffes befestigt.
Für die Fächerecholotvermessung ist es allerdings günstiger, wenn die Einzelkomponenten möglichst dicht beieinander liegen, da sich die Ungenauigkeit von Kreiselkompass und Bewegungssensor linear mit ihrer Entfernung von GPS-Antenne und Fächerecholotschwinger erhöht. Deshalb wurden sie bei der Messung im Oktober 2002 in der Mitte an der Backbordseite (in Fahrtrichtung links) des Schiffes angebracht, womit sich die Entfernung von 8 m auf 3,5 m verringerte. Damit verringerte sich der Fehler auch etwa um die Hälfte [5] (abhängig von der Wellenhöhe).

Bei der Messung im Oktober 2003 waren GPS-Antenne und Fächerecholotschwinger im Zentrum des Schiffes installiert, dabei wurde der Schwinger in einen Schacht im Boden der LUDWIG PRANDTL eingelassen und die GPS-Antenne auf das Dach montiert. Auf diese Weise wurde die Entfernung von GPS-Antenne und Fächerecholotschwinger zu Kreiselkompass und Bewegungssensor in x- und y-Richtung auf wenige Zentimeter reduziert und auch in z-Richtung minimiert.

Tabelle 2: Zeittafel der Messkampagnen.

Messkampagnen	Datum	Richtung	Dauer [h:min]	Windstärke [Bft] (siehe ANHANG C)	Wellenhöhe [m]
GPS und Fächerecholotschwinger am Bug (vorne) des Schiffes					
Juni 2001 (Nullmessung)	18. Jun	WO	3:00	5-6	1-1,5
	20. Jun	NS	4:30	5-6	1-1,5
Juni 2001	25. Jun	WO	3:14	6	1,5
	26. Jun	NS	4:57	2-3	0,2-0,3
August 2001	20. Aug	WO	4:12	2-3	0,2
	21. Aug	NS	5:01	2-3	0,2
GPS und Fächerecholotschwinger an der Backbordseite (links) des Schiffes					
Oktober 2002	25. Okt	WO	2:45	7	1,5–2
		NS	2:56	7	1,5–2
GPS und Fächerecholotschwinger im Zentrum des Schiffes (GPS auf dem Dach, Schwinger in einem Schacht im Boden der PRANDTL)					
Oktober 2003	15. Okt	NS	6:56	2-3	0,5
	16. Okt	WO+Stern	7:48	1-2	0,1–0,2

3.3 Beschreibung der Messkampagnen

3.3.1 Nullmessung, 18. + 20. Juni 2001

Vor der Verklappung des Materials aus dem Hafen von Warnemünde fand am 18. und 20. Juni 2001 eine Nullmessung statt, um eine Karte des Originalseebodens für die Auswertung erstellen zu können. Am 18. Juni 2001 betrug die Windstärke 5–6 Bft und die Höhe der Wellen lag zwischen 1 m und 1,5 m. Da bei dieser Wellenstärke der Fächerecholotschwinger am Bug des Schiffes aus dem Wasser gehoben wurde, musste die Messung bereits nach 8 Messlinien abgebrochen werden.

Am 20. Juni sollte die Messung wiederholt werden, aber wegen wiederholten Ausfällen des Kreiselkompasses konnte der Schwinger während der Datenaufnahme nicht korrekt lotrecht und quer zur Fahrtrichtung ausgerichtet werden, weshalb der Datensatz unbrauchbar wurde. Der Kreiselkompass musste ausgetauscht werden.
Da die Verklappung bereits am 20./21. Juni 2001 stattfand, konnte keine weitere Kampagne gestartet werden.

Aufgrund der Aussage eines Tauchers war aber bekannt, dass der Boden keine groben Unebenheiten, sondern nur eine leichte Wellenstruktur mit einer Wellenlänge von ca. 20 cm und einer Amplitude von ca. 2 cm aufwies.

3.3.2 Erste Vermessung: 25. + 26. Juni 2001

Die erste Vermessung des Klappfeldes nach der Verklappung fand am 25. und 26. Juni 2001 statt. Dabei wurde das Gebiet am 25. Juni in östlicher bzw. westlicher Richtung (WO) überfahren und am 26. Juni in nördlicher bzw. südlicher Richtung (NS).

Bei beiden Messungen war eine wellenartige Struktur mit einer Wellenlänge von ca. 10 m auf dem Geländemodell zu sehen (*siehe Abbildung 26*), dabei sind die Wellenstrukturen in den WO-Linien deutlich stärker ausgeprägt (Amplitude ca. 80 cm) als bei den NS-Linien (Amplitude ca. 20 cm).

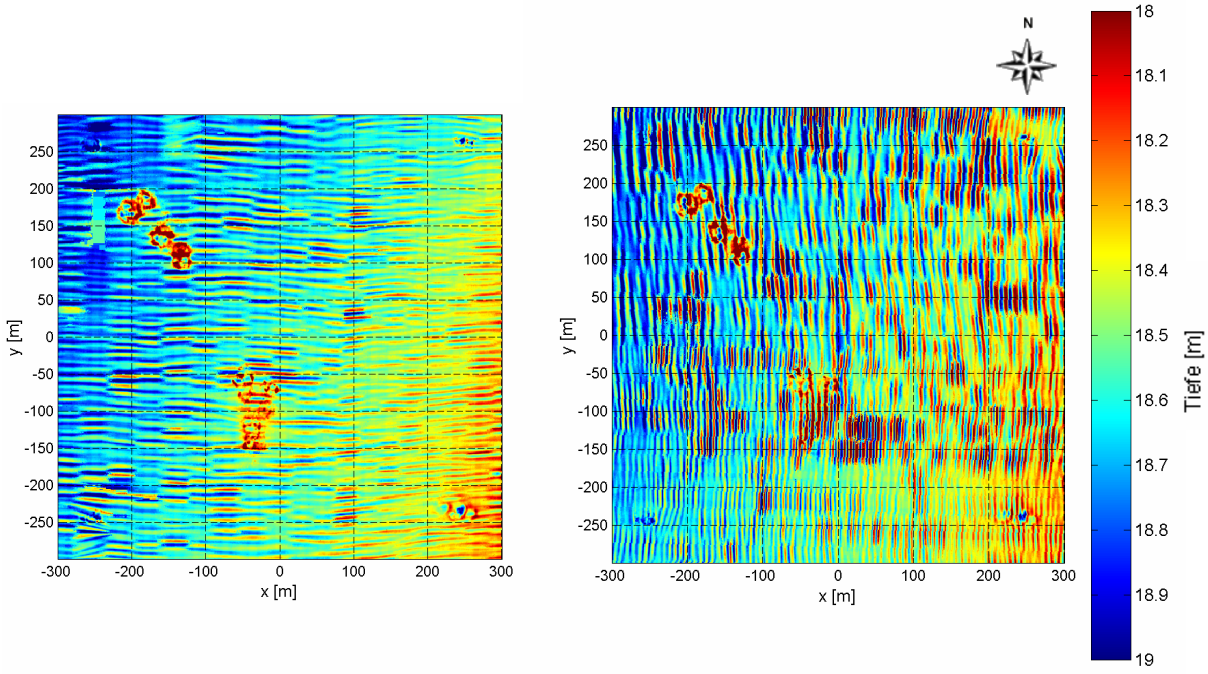


Abbildung 26: Juni 2001, Messung mit zu trägen Einstellungen des Bewegungssensors, NS-Linien (links), WO-Linien (rechts).

3.3.3 Zweite Vermessung: 20. + 21. August 2001

Die nächste Vermessung fand im August 2001 statt. Dabei wurden am 20. August 2001 die WO-Linien und am 21. die NS-Linien vermessen.

Der Datensatz wurde mit 400 % Überdeckung aufgenommen und besitzt deshalb eine Datendichte von 25–50 Punkten pro Quadratmeter. Außerhalb der Klappstellen sind keine quasi-permanenten Strukturen mehr zu erkennen (*siehe Abbildung 27)*, da die Trägheit des Bewegungssensors im August 2001 bereits auf die Gegebenheiten des Forschungsschiffs LUDWIG PRANDTL abgestimmt wurde.

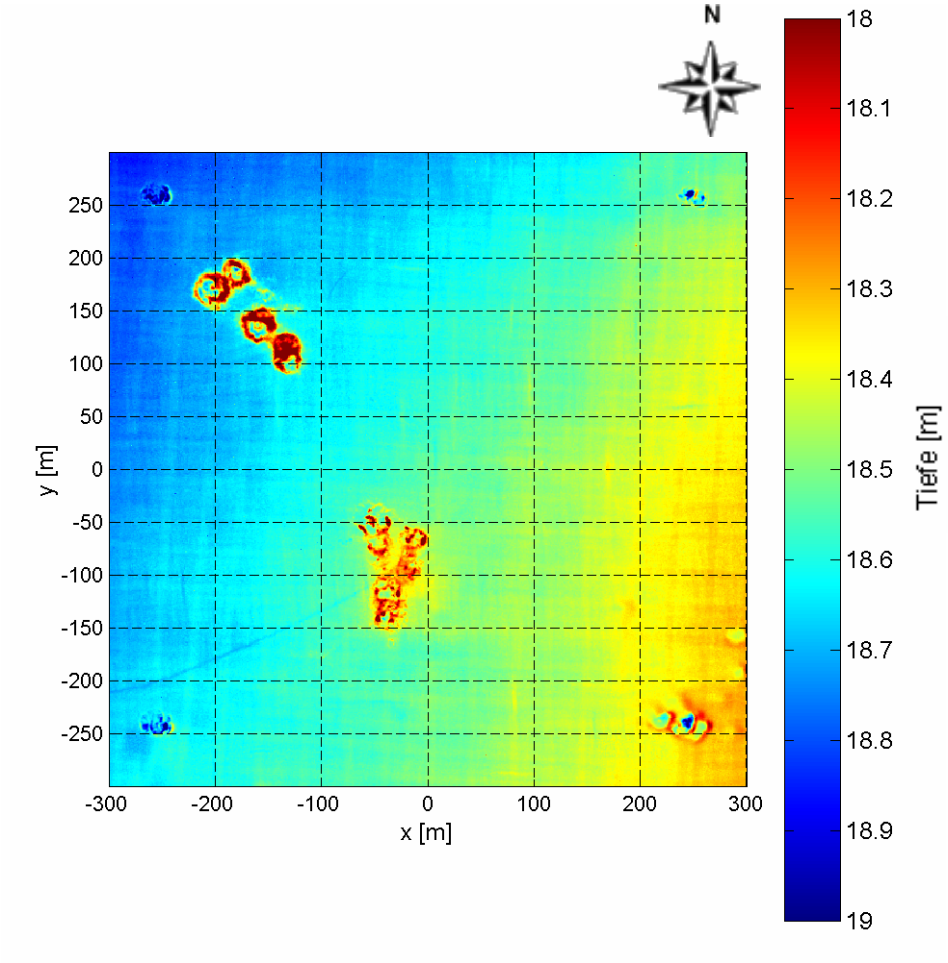


Abbildung 27: Messung vom August 2001, Daten der WO- und NS-Vermessung in einem Geländemodell.

3.3.4 Dritte Vermessung: 25. Oktober 2002

Bei der Messung im Oktober 2002 waren Fächerecholotschwinger und GPS-Empfänger an der Backbordseite des Schiffes festgemacht, weil der Abstand zum Bewegungssensor verringert werden sollte. Damit sollten Fehler verringert werden, welche durch die unterschiedliche Auslenkung von Bug und Schiffsmitte bei Wellenbewegungen entstehen.

Bei dieser Messung traten zahlreiche Fehler auf, deren Ursache nicht vollständig geklärt ist (*siehe Abbildungen 28 und 29)*.

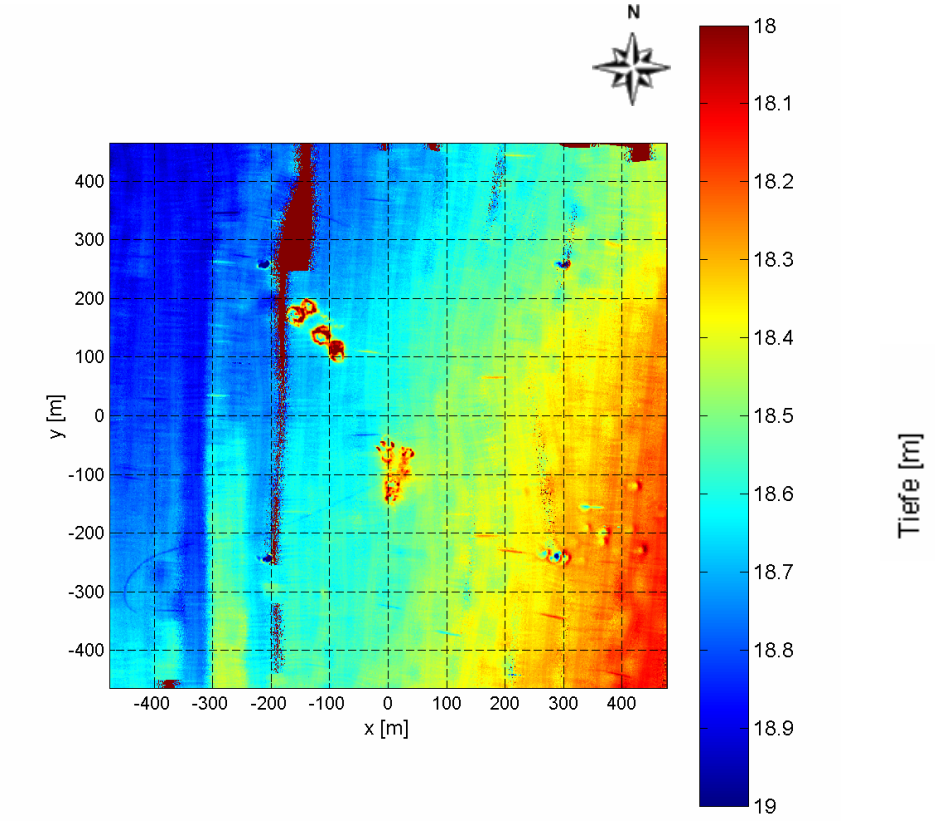


Abbildung 28: Messung von Oktober 2002, NS-Linien.

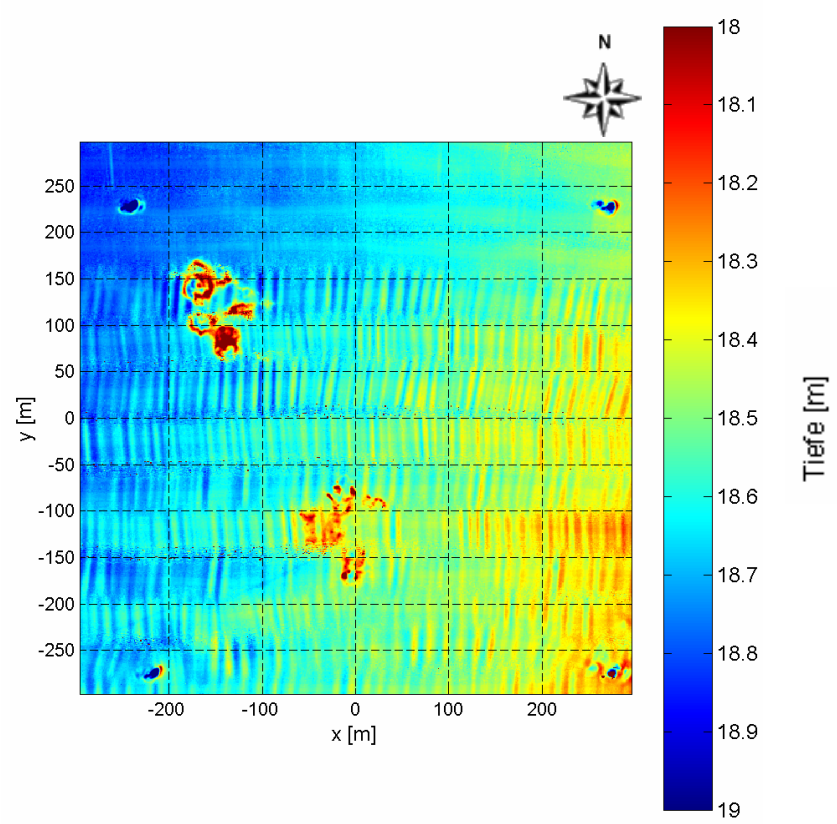


Abbildung 29: Messung von Oktober 2002, WO-Linien.

Bei den Schiffslinien n östlicher bzw. westlcher Richtung traten zwei deutliche Fehler auf. Zum einen sind die Strukturen des Seebodens, den das Schiff in westlicher Richtung (in Abbildungen 30 und 31→OW) überfahren hat, scheinbar um 40 m gegen den Seeboden verschoben, den das Schiff in östlicher Richtung (in Abbildungen 30 und 31 →WO) überfahren hat. Diese Verschiebung ist im Vergleich zu der Messung vom August 2001 deutlich zu erkennen (*siehe Abbildungen 30 und 31*). Bei den WO-Linien trat also eine Positionsverschiebung um jeweils 20 m in Fahrtrichtung auf. Zum anderen scheint bei den fehlerhaften Linien keine Korrektur der Schiffsbewegung durch den Bewegungssensor stattgefunden zu haben.

Diese beiden Fehler traten bei den WO-Linien im nördlichen Teil des Messbereiches nicht mehr auf, obwohl an den Messeinstellungen keine Änderungen vorgenommen wurden (*siehe Abbildung 29*).

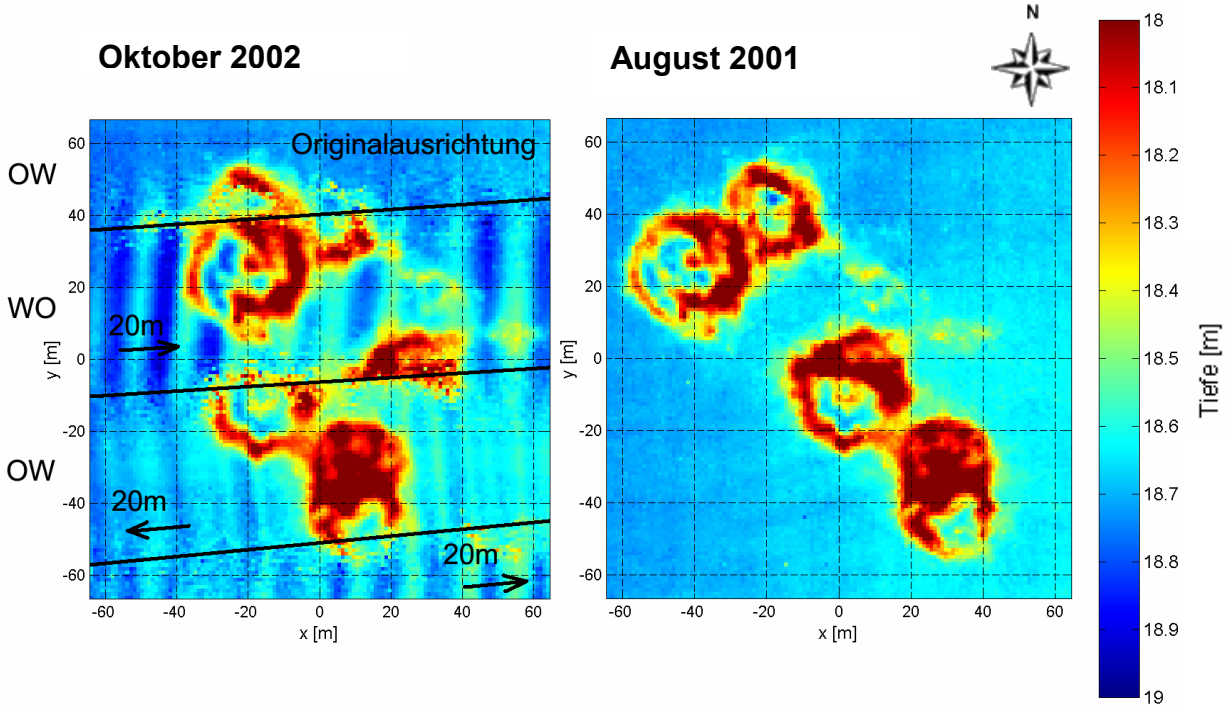


Abbildung 30: Mergelklappstelle, Oktober 2002 (WO-Linien) (links), August 2001 zum Vergleich (WO- und NS-Linien)(rechts).

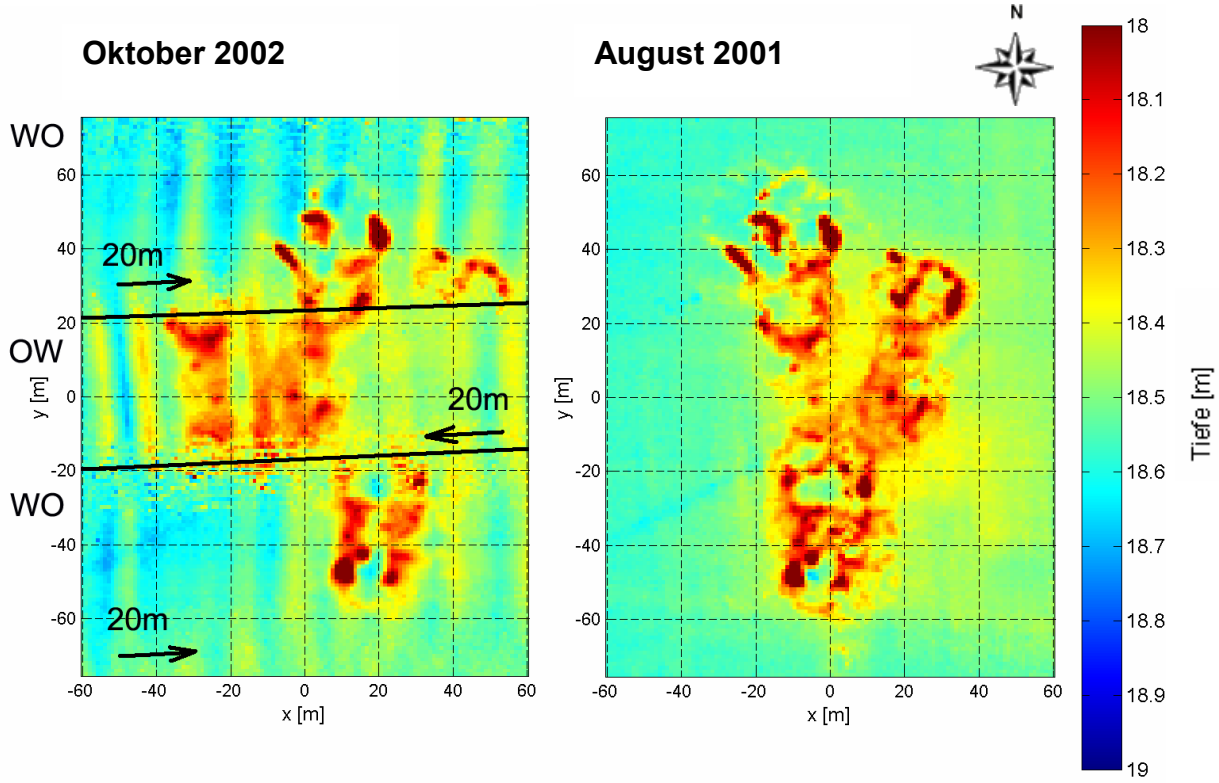


Abbildung 31: Mischbodenklappstelle, Oktober 2002 (WO-Messung) (links), August 2001 zum Vergleich (WO+NS)(rechts).

Bei den NS-Linien (*siehe Abbildung 28*) treten Sprünge zwischen den einzelnen Schiffslinien auf. Die durchschnittlichen Tiefenwerte der einzelnen Fahrtlinien liegen bis zu 20 cm über bzw. unter der benachbarten Fahrtlinie. In einem Fall liegt der Unterschied sogar bei 60 cm.

Außerdem sind unregelmäßig über die Karte verteilt Furchen und Ausbuchtungen quer zur Fahrtrichtung zu erkennen, welche auf dem Seeboden nicht existieren. Eine davon verläuft direkt über die Mischbodenklappstelle, was allerdings erst auf dem Differenzbild mit den Messungen von August 2001 oder Oktober 2003 sichtbar wird (*siehe Abbildungen 32 und 33*).

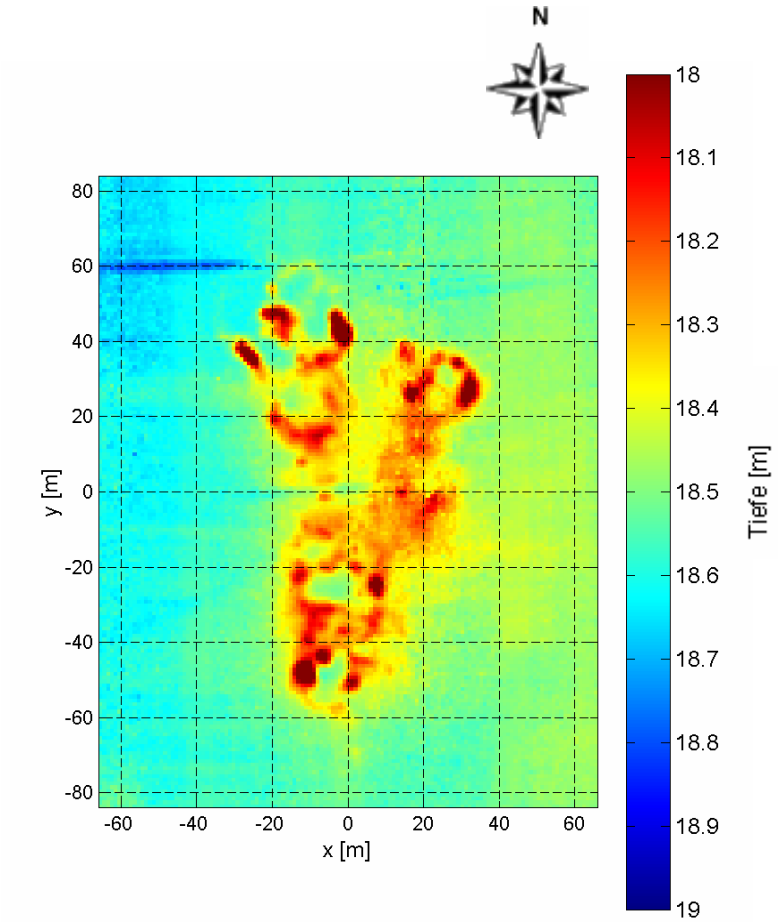


Abbildung 32: Mischbodenklappstelle, Oktober 2002.

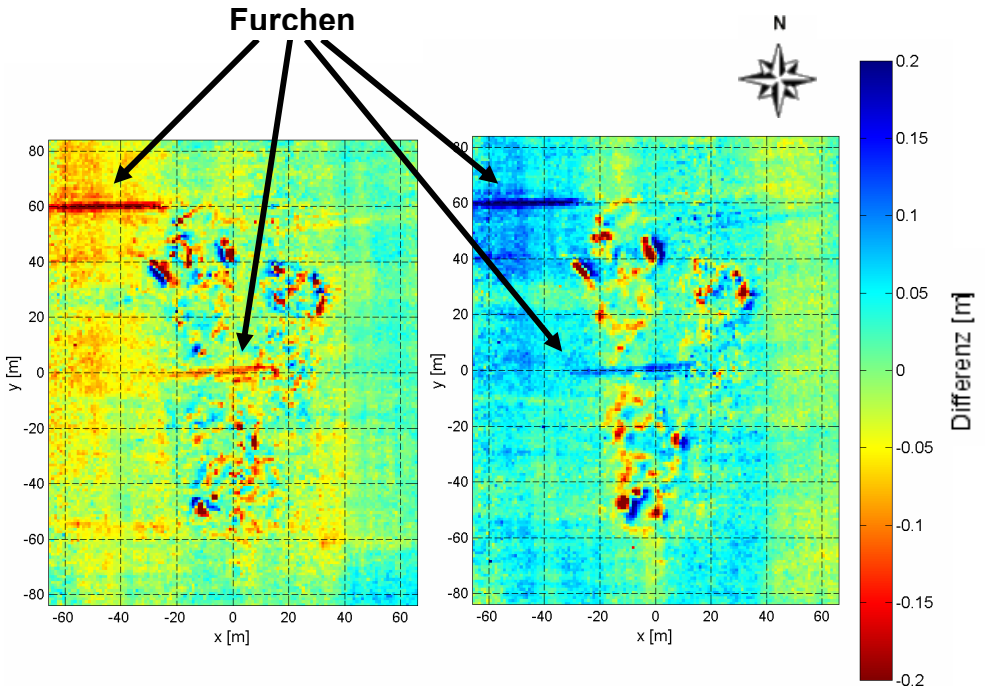


Abbildung 33: Differenzbilder der Mischbodenklappstelle, August 2001 – Oktober 2002 (links), Oktober 2002 – Oktober 2003 (rechts).

Zusätzlich fehlt bei dieser Messung eine Schifflinie in der Nähe des Mergelgebietes (*siehe Abbildung 34*).

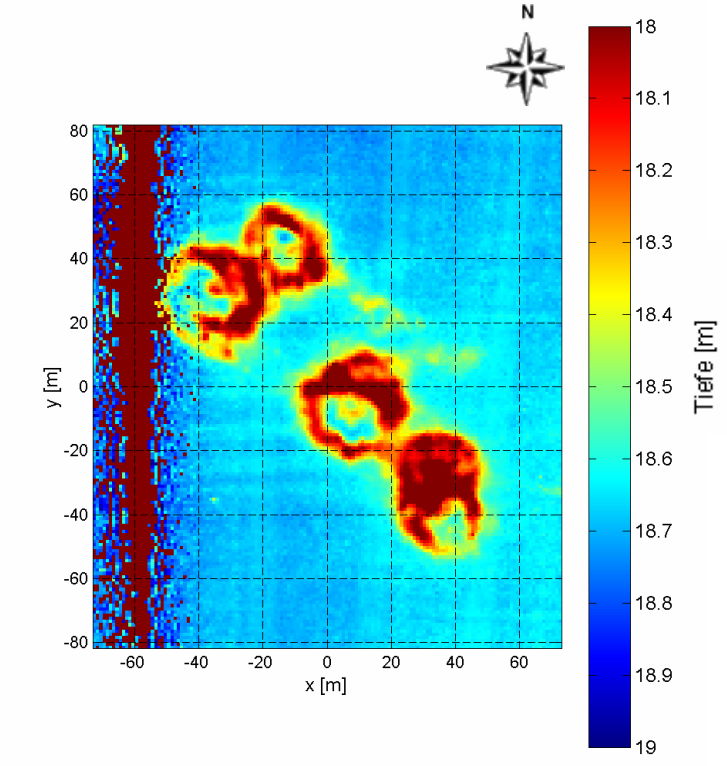


Abbildung 34: Mergelklappstelle, Oktober 2002, NS-Linien.

3.3.5 Vierte Vermessung: 15. + 16. Oktober 2003

Die Messung im Oktober 2003 wurde mit 400 % Überdeckung über den Randgebieten und mehr als 800 % Überdeckung über den Klappstellen aufgenommen. Der Datensatz hatte direkt über den Klappstellen von allen bisher durchgeführten Messungen die höchste Datendichte von 25–100 Datenpunkten pro m² (*siehe Abbildung 35*).

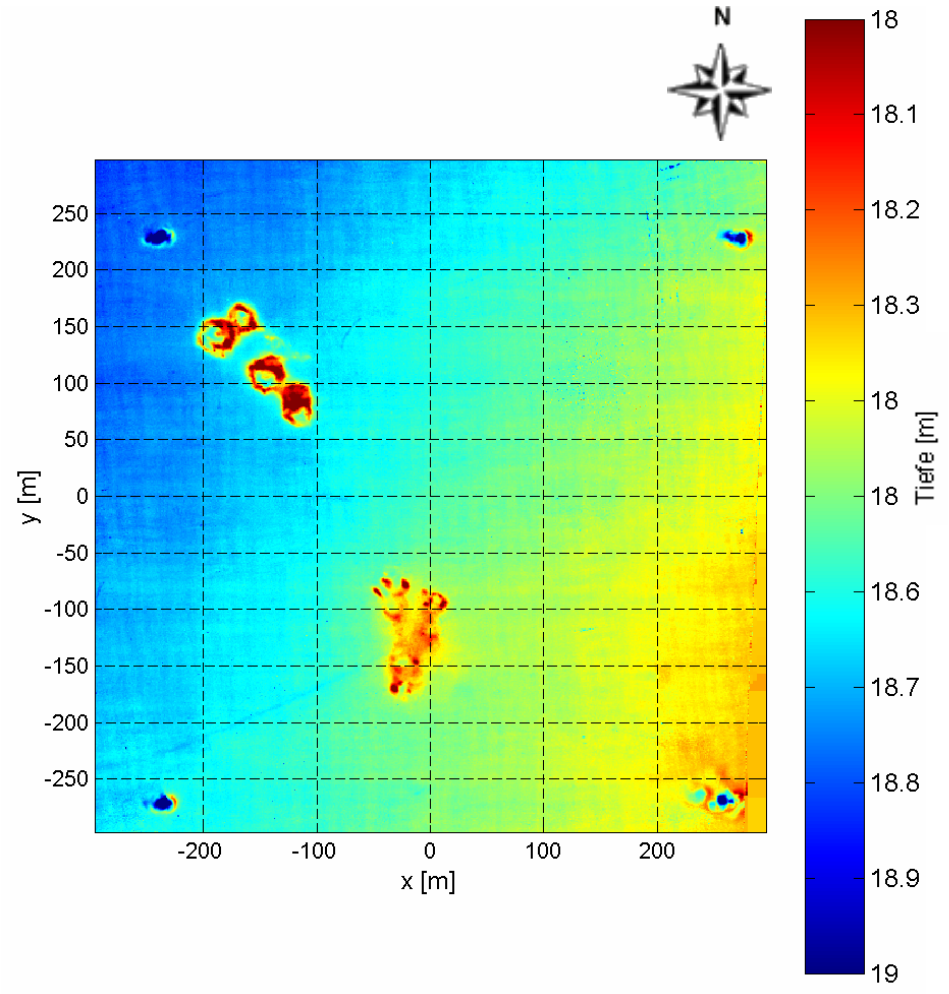


Abbildung 35: Messung vom Oktober 2003, WO- und NS-Linien.

4 Korrektur der Geländemodelle

4.1 Fehlereffekte

Nach der Korrektur und Überarbeitung der Daten mit dem Programm Neptune© und der Geländemodellierung mit dem Programm CFloor© lagen die vier gemessenen Datensätze (Juni 2001, August 2001, Oktober 2002, Oktober 2003) in Form eines Geländemodells mit einer Gittergröße von 1 m vor.

Die Datensätze wurden aber durch zwei messtechnisch bedingte Effekte verfälscht. Zum einen entstanden durch eine unzureichende Kompensation der Schiffsbewegung Wellenstrukturen auf den Geländemodellen von Juni 2001 und Oktober 2002. Zum anderen unterscheiden sich alle vier Messungen jeweils um konstante, von Messung zu Messung schwankende Offsets voneinander.

Diese Effekte sollten vor der Datenauswertung mit dem Programm MorphDyn© der Firma V2T korrigiert werden.

4.2 Offset

Zwischen den einzelnen Messungen existieren Tiefenoffsets. Dass es sich dabei um Offsets und nicht um reale Veränderungen handelt, sieht man daran, dass sich Form und Absoluttiefe der Schleppbrettspur im Südwesten des Klappgebietes nicht verändert haben (*siehe Abbildung 36*). Das gesamte Gebiet scheint nur um eine Konstante vertikal versetzt worden zu sein.

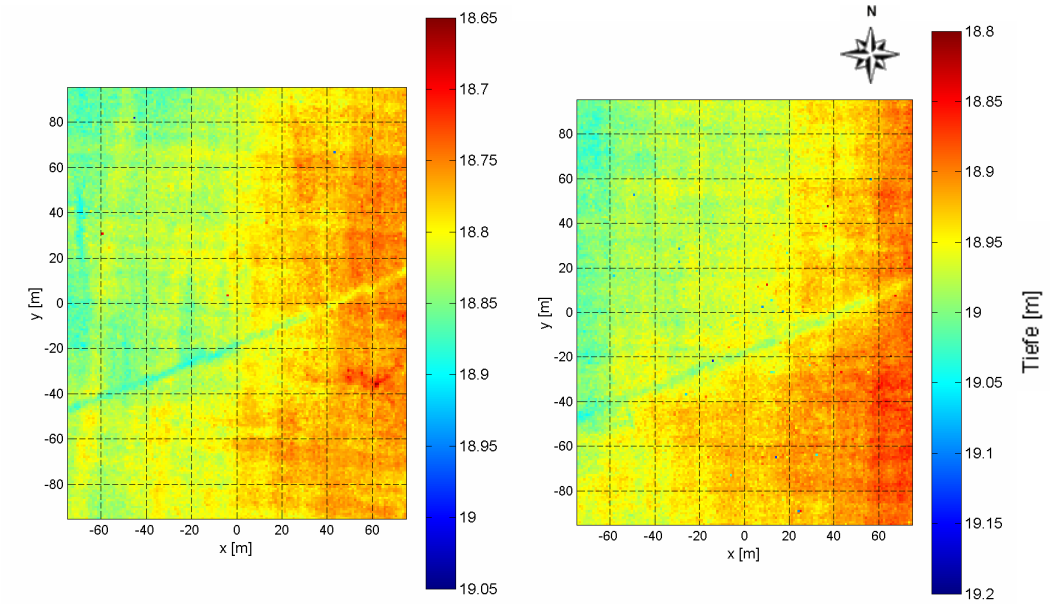


Abbildung 36: Vergleich der Schleppbrettspur August 2001 (links) mit Oktober 2003 (rechts).

4.2.1 Fehlerquelle des Offsets

Bei allen Messkampagnen ist das gesamte Geländemodell entlang der Tiefenachse (z-Achse) gegenüber der vorhergehenden Messung verschoben. Dabei ist der Betrag der Verschiebung bei jeder Messkampagne ein anderer.

Ein Messfehler des Bewegungssensors kann als Ursache ausgeschlossen werden. Die Daten, welche mit diesem Gerät aufgezeichnet werden, sind abhängig von der Bewegung des Schiffes durch den Wellengang. Wenn ein Fehler im Bewegungssensor vorliegen würde, wäre die Messung an jedem Punkt in allen drei Raumrichtungen verändert und nicht gleichmäßig über dem Gesamtgebiet um einen konstanten Betrag in z-Richtung.

Auch eine falsche Aufnahme des Wasserschallprofils kann keinen derartigen Fehler hervorrufen. Eine fehlerhafte Messung der Schallgeschwindigkeit würde zwar die mit dem Fächerecholot gemessenen Tiefen verändern, doch dieser Fehler würde sich an den Randstrahlen des Fächers stärker auswirken als im Mittelstrahl, da die Randstrahlen einen längeren Weg durch das Wasser zurückzulegen haben. Eine konstante Veränderung der Tiefenwerte über dem gesamten Gebiet würde also auch in diesem Fall nicht auftreten.

Das Gleiche gilt für die Messung der Laufzeiten des Signals mit dem Fächerecholot. Ein konstanter Fehler in der Zeitmessung würde sich zwar den gemessenen Tiefenwert beeinflussen, die Auswirkungen wären jedoch abhängig vom Fächerwinkel und könnten nicht überall den selben Wert annehmen.

Ein fehlerhaftes Gerät des Fächerecholotsystems hätte bei jeder Kampagne einen anderen, aber während der gesamten Fahrt konstanten Fehler aufweisen müssen. Dieser Tiefenoffset kann also nicht durch Messfehler der Komponenten des Fächerecholotsystems entstanden sein. Er entstand vermutlich aufgrund geometrischer Veränderungen im Aufbau der Messanordnung oder Umbauten auf dem Messschiff. Die Höhe der Referenzstation des GPS-Systems in Nienhagen könnte nach dem Aufbau ungenau eingemessen worden sein. Auch eine fehlerhafte Vermessung der Einzelkomponenten nach den Umbauten auf dem Schiff könnte einen solchen Fehler hervorrufen. Die genaue Herkunft dieser Tiefendifferenzen ist zum jetzigen Zeitpunkt allerdings nicht mehr nachvollziehbar.

4.2.2 Durchführung der Offsetkorrektur

In Abbildung 35 ist zu sehen, dass die Form der Schleppbrettspur nahezu unverändert ist. Die beiden Bilder von August 2001 und Oktober 2003 unterscheiden sich nur um einen Offset von ca. 16 cm (siehe Tiefenskalierung).

Um diese Offsetfehler korrigieren zu können, braucht man die genaue Tiefendifferenz, um die sich die Messungen unterscheiden. Dazu wurde die gemittelte Tiefe über einem ebenen Gebiet berechnet, welches die Schleppbrettspur enthielt (*siehe Abbildung 37*), weil bei diesem Gebiet davon ausgegangen werden konnte, dass es in dem Zeitraum von Juni 2001 bis Oktober 2003 keinen Materialverlagerungen unterworfen war. Diese Referenzfläche wurde zur Bestimmung des Offsets benutzt.

Der Betrag des Offsets wurde ermittelt, indem ein Differenzbild der Referenzfläche erstellt wurde. Die mittlere Tiefendifferenz wurde zur Korrektur der Tiefenwerte der Datensätze verwendet. Nach dieser Korrektur lag die mittlere Differenz zwischen zwei Referenzflächen bei weniger als 1 mm.

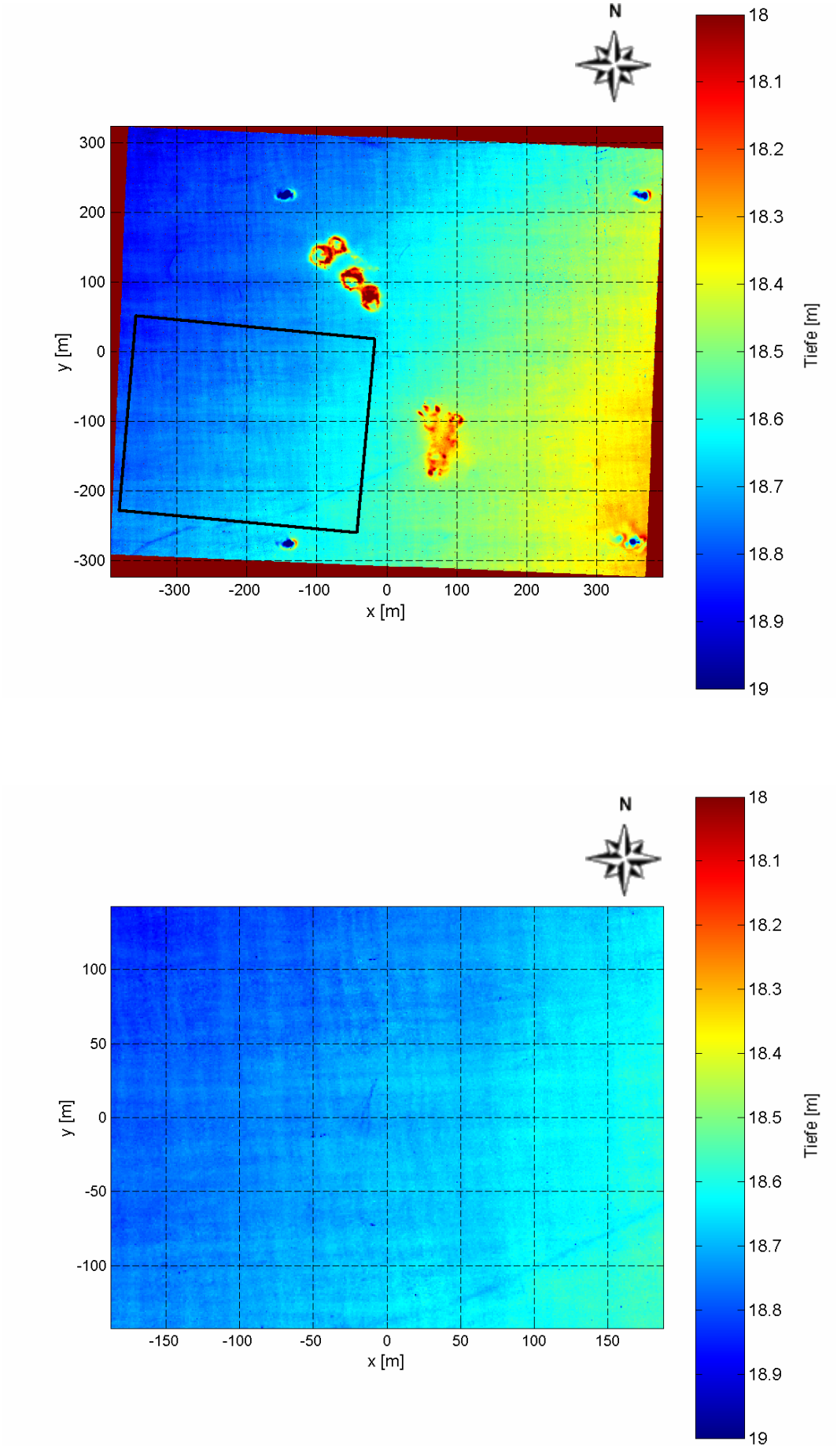


Abbildung 37: Referenzfläche zur Offsetkorrektur (Oktober 2003).

Kartenparameter der Referenzfläche (Gauß-Krüger)*:*

ce = Kennziffer 4; 493376,1917m

= 4493376,1917m Nullpunktkoordinaten, östlich

cn = 6008217,3141m Nullpunktkoordinaten, nördlich

rot = 15,1011° Auslenkung im Uhrzeigersinn gegen Nord

nx = 373m Länge in x-Richtung

ny = 266m Länge in y-Richtung.

Tabelle 3: Werte für die Offsetkorrektur.

Zeit	Mittlere Tiefe in m	Offsetkorrektur in m
Juni 2001	18,559	
August 2001	18,751	-0,192
Oktober 2002	18,768	-0,209
Oktober 2003	18,91	-0,351

Das Differenzbild der offsetkorrigierten Referenzfläche zwischen August 2001 und Oktober 2003 lässt die Schleppbrettspur verschwinden (*siehe Abbildung 38*).

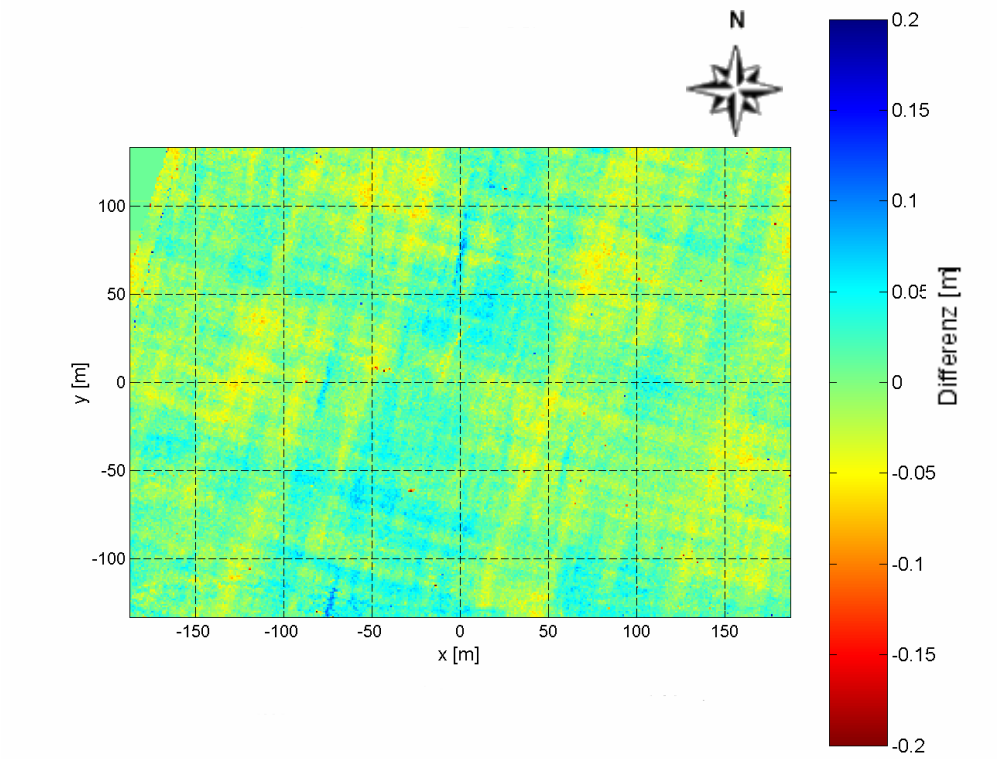


Abbildung 38: Differenzbild der Referenzfläche nach der Korrektur (August 2001 – Oktober 2003).

4.3 Wellenstrukturen

Bei den Messkampagnen im Juni 2001 und im Oktober 2002 entstanden auf dem Geländemodell Wellenstrukturen (siehe Abbildungen Kapitel 3.3.2 und 3.3.4). Diese Wellenstrukturen treten bei der Messung im Oktober 2002 nur in bei den Fahrtlinien in östlicher bzw. westlicher Richtung in der Boden-Topographie auf. Bei der Messung im Juni 2001 sind sie auf allen Fahrtlinien zu finden, wobei die Wellenstrukturen der WO-Linien um 90° gegen die Wellenstrukturen der NS-Linien gedreht sind.

4.3.1 Fehlerquelle der Wellenstrukturen

Da die Wellenstruktur im Juni 2001 bei den Daten der NS-Linien um 90° gegen die Struktur bei den Daten der WO-Linien gedreht ist, musste ein Systemfehler vorliegen.
Diese Strukturen entstanden, weil der Bewegungssensor zu träge eingestellt war. Da am 25. Juni bei einer größeren Windstärke und Wellenhöhe gemessen wurde, sind die Wellenstrukturen in den WO-Linien deutlich stärker ausgeprägt (Amplitude ca. 80 cm) als bei den NS-Linien (Amplitude ca. 20 cm) (*siehe Abbildung 26, Abschnitt 3.3.2*).

Nachdem die Trägheit des Bewegungssensors von der Firma Simrad deutlich verringert wurde ist dieser Fehler auch bei wesentlich höheren Windstärken bei den nachfolgenden Messungen nicht noch einmal aufgetreten.

Die Wellenstrukturen auf dem Geländemodell der Messung vom Oktober 2002 treten nicht über der gesamten Messstrecke auf. Nur ein Teil der WO-Linien ist betroffen (*siehe Abbildung 27, Kapitel 3.3.4*). Bei den fehlerhaften WO-Linien ist die Positionsbestimmung mittels GPS nicht korrekt und die Korrektur der Schiffsbewegung mit dem Bewegungssensor wurde nicht durchgeführt. Außerdem sind die Positionsverschiebungen und die Wellenstrukturen im nördlichen Bereich des Geländes nicht mehr vorhanden, obwohl während der Messung keine Messeinstellungen verändert wurden. Es ist unwahrscheinlich, dass GPS und Bewegungssensor zur gleichen Zeit eine Funktionsstörung hatten, deshalb handelte es sich bei der Messung im Oktober 2002 wahrscheinlich um einen Fehler in der Datenschnittstelle bei der Zusammenstellung der Daten.

4.3.2 Korrektur der Wellenstrukturen

Da die Fehlerstrukturen der Messungen vom Juni 2001 und von Oktober 2002 periodisch sind (siehe *Abbildung 39*), können sie bis zu einem gewissen Grad herausgefiltert werden.

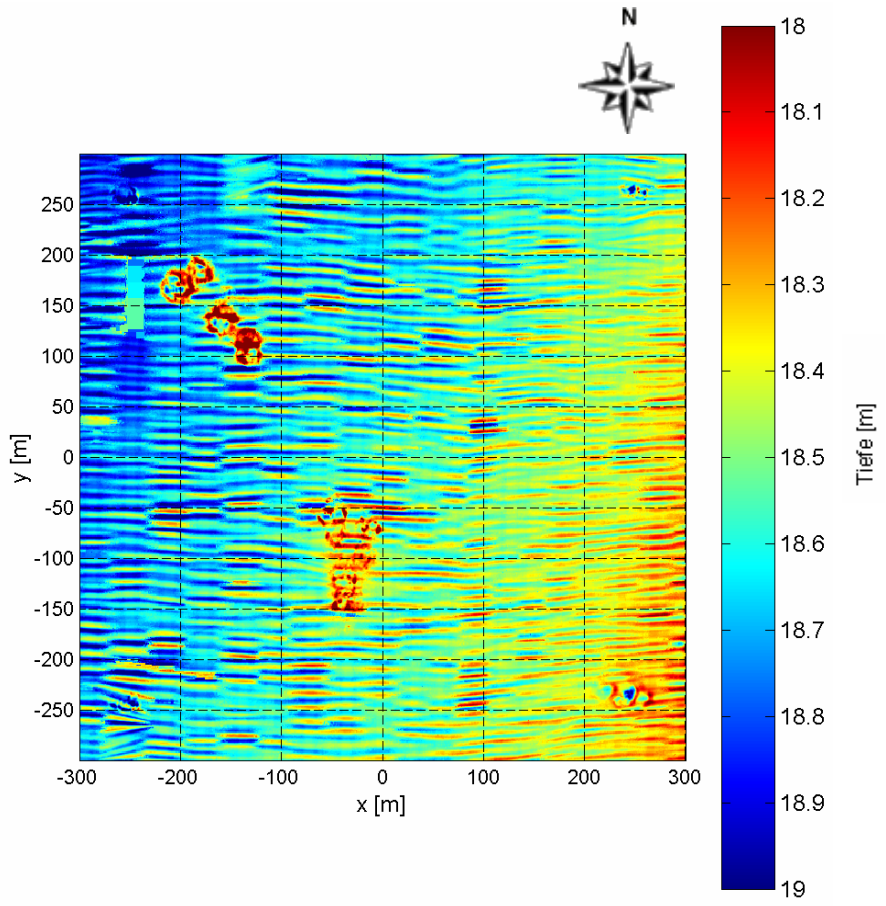


Abbildung 39: Bodenbathymetrie der Messung im Juni 2001. Deutlich erkennbar sind die wellenartigen Strukturen aus der unzureichenden Kompensation durch den Bewegungssensor.

Um die periodischen Störstrukturen in der Abbildung zu korrigieren, wird zuerst eine zweidimensionale Fast-Fourier-Transformation (FFT 2D) durchgeführt. Damit wird das Bild in den Frequenz-/ Wellenzahlraum g(k) überführt.

$$g(\vec{k}) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} g(x,y) * e^{-i(k_x x + k_y y)}\, dxdy$$

Eine Darstellung des Wellenzahlraumes der Messungen vom August 2001 oder Oktober 2003 weist nur ein Häufigkeitsmaximum der Wellenzahlen um den Nullpunkt auf, da die Verklappungsstrukturen nicht periodisch sind (*siehe Abbildung 40*).

Bei der Messung vom Juni 2001 ist dieses Maximum am Nullpunkt des Wellenzahlraumes auch vorhanden. Zusätzlich sind die im Beispiel in Abbildung 38 in WO-Richtung verlaufenden Störmuster nach der FFT 2D im Wellenzahlraum als Häufigkeitsmaxima auf der ky-Achse deutlich zu erkennen.
Des weiteren ist zu sehen, dass die Wellenzahlen der Karten vom August 2001 und Oktober 2003 einen Wert von 1,5 rad/m nicht überschreiten. Die Wellenzahlen im Juni 2001 dagegen erreichen auf der ky- und auf der kx-Achse Werte von bis zu 2rad/m und darüber hinaus.

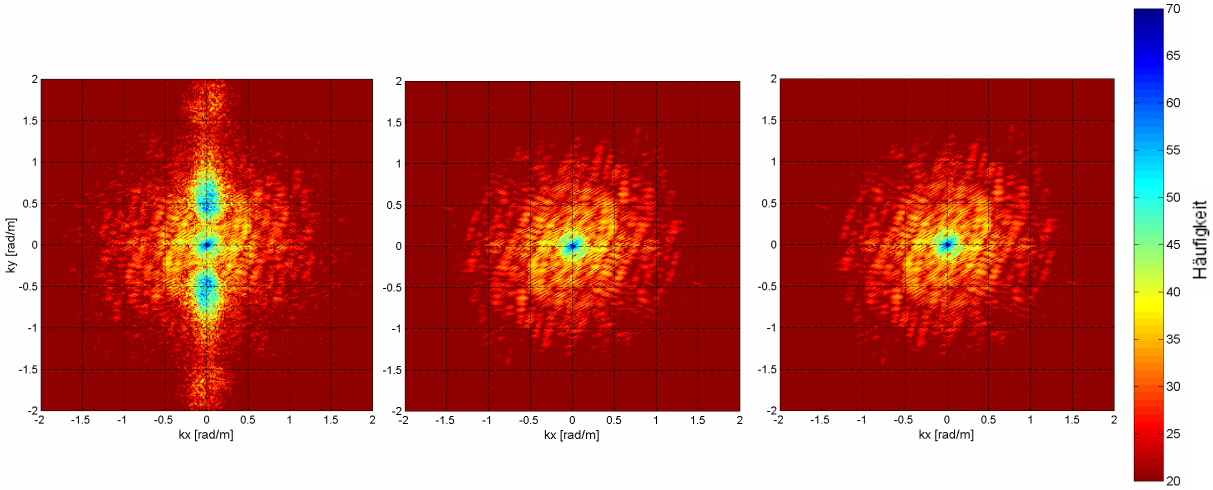


Abbildung 40: Wellenzahlraum des Bildes (Abbildung 39) mit Intensitätsmaxima, links – Juni 2001 nur NS-Linien, Mitte – August 2001 WO- und NS-Linien, rechts – Oktober 2003 WO- und NS-Linien.

Die Häufigkeitsmaxima, welche durch die Wellenstrukturen entstanden, wurden mit einer Filtermaske ausgeschnitten. Bei diesem Filter handelt es sich um eine Matrix, welche dem zu betrachtenden Bereich den Wert 1 und dem darum liegenden Bereich den Wert Null zuweist, dabei werden die Grenzen des Filters mit einer Gaußkurve geglättet um Randeffekte zu vermeiden (*siehe Abbildung 41*). Durch eine Multiplikation der einzelnen Elemente des Filters und der Matrix des Wellenzahlraumes, wird der Bereich der Störstrukturen ausgeschnitten.

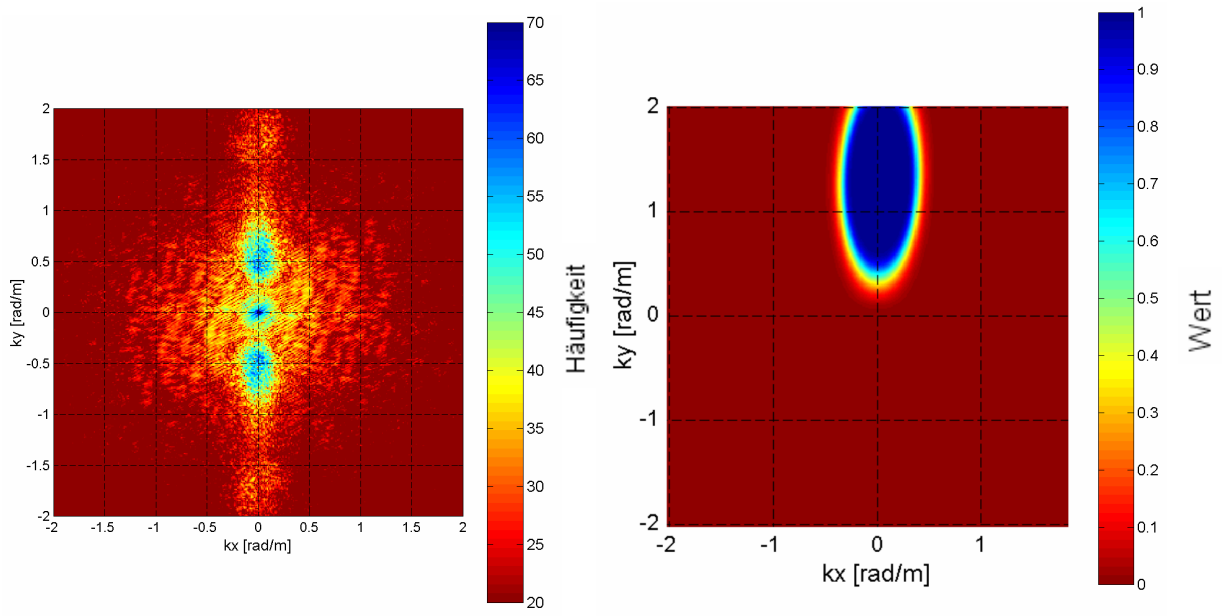


Abbildung 41: rechts – Filtermaske zum Ausschneiden der Störstrukturen, links Wellenzahlraum der NS-Linien der Messung von Juni 2001.

Der ausgeschnittene Bereich wird mit der inversen FFT 2D wieder in den Bildraum g(x,y) transformiert. Das Ergebnis ist ein Bild, welches nur noch die Störstellen enthält (*siehe Abbildung 42)*.

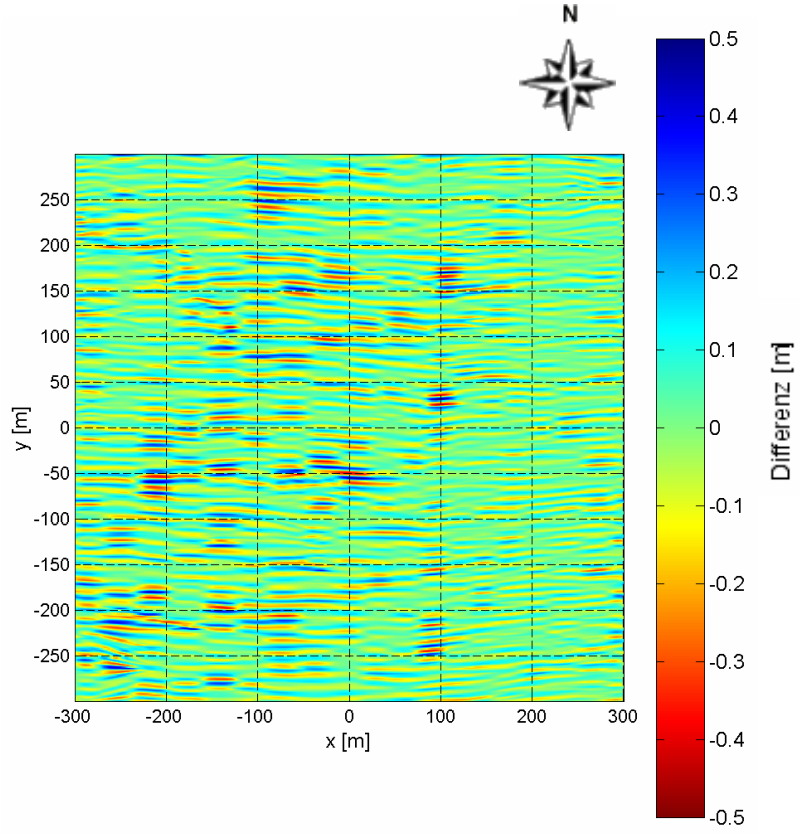


Abbildung 42: Bild der Störstrukturen von Juni 2001.

Um ein wellenkorrigiertes Bild zu erhalten (*siehe Abbildung 43*), wird das Bild der Störstellen vom Originalbild subtrahiert.

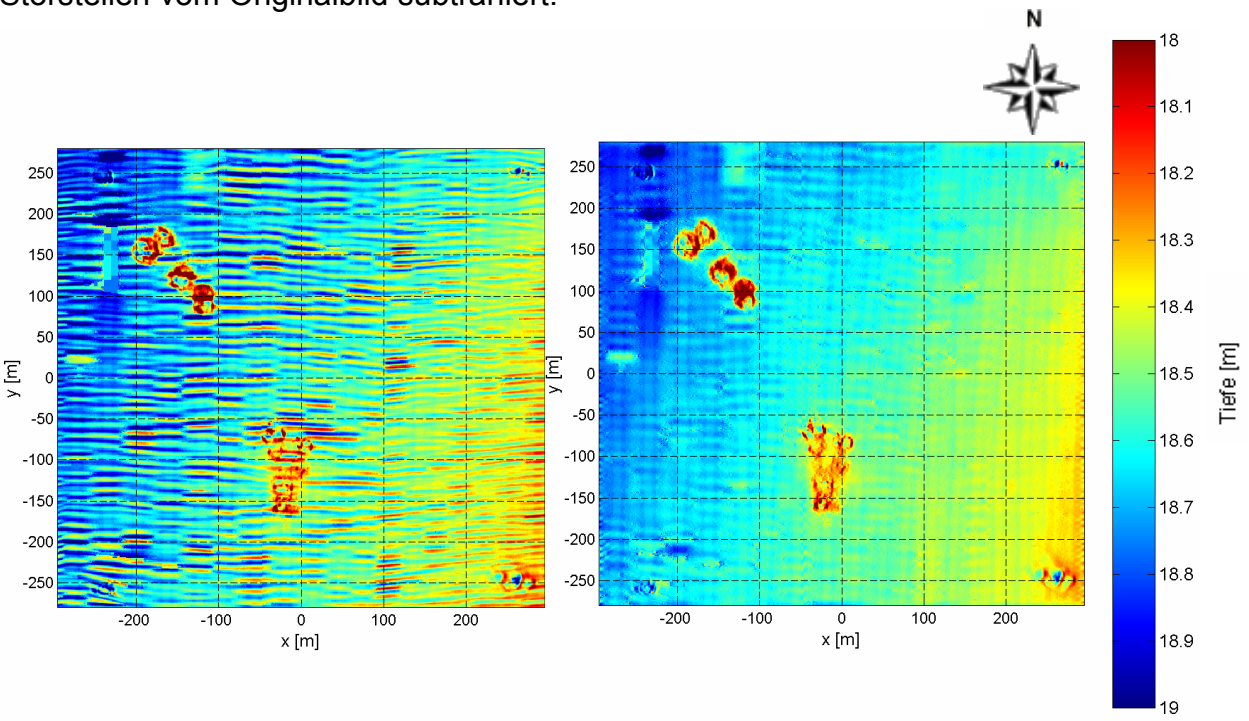


Abbildung 43: Originalbild (links) und wellenkorrigiertes Bild (rechts).

Wenn auf einem Bild mehrere periodische Störstrukturen mit unterschiedlicher Wellenzahl vorliegen, kann dieser Korrekturalgorithmus kann auch mehrmals hintereinander durchgeführt werden.

4.4 Verwendbarkeit der Messdaten

Weil die Wellenzahlen der Verklappungsstrukturen teilweise in der Größenordnung der Wellenzahlen der Störwellen liegen, werden sie bei der Filterung der Wellenstrukturen mit herausgefiltert.

In den Abbildungen 44 und 45 ist zu sehen, dass sich die Strukturen der Verklappungsstellen mit auf die Korrektur auswirken. Je stärker die Störwellen also herausgefiltert werden, desto mehr Informationen über tatsächlich existierende Strukturen in der Größenordnung der Störwellen gehen mit verloren (*siehe Abbildungen 46–48*). Eine Wellenkorrektur ist mit dieser Methode nur dann möglich, wenn sich die Frequenz der Störwellen deutlich von der Frequenz der zu untersuchenden Welle/Struktur unterscheidet.

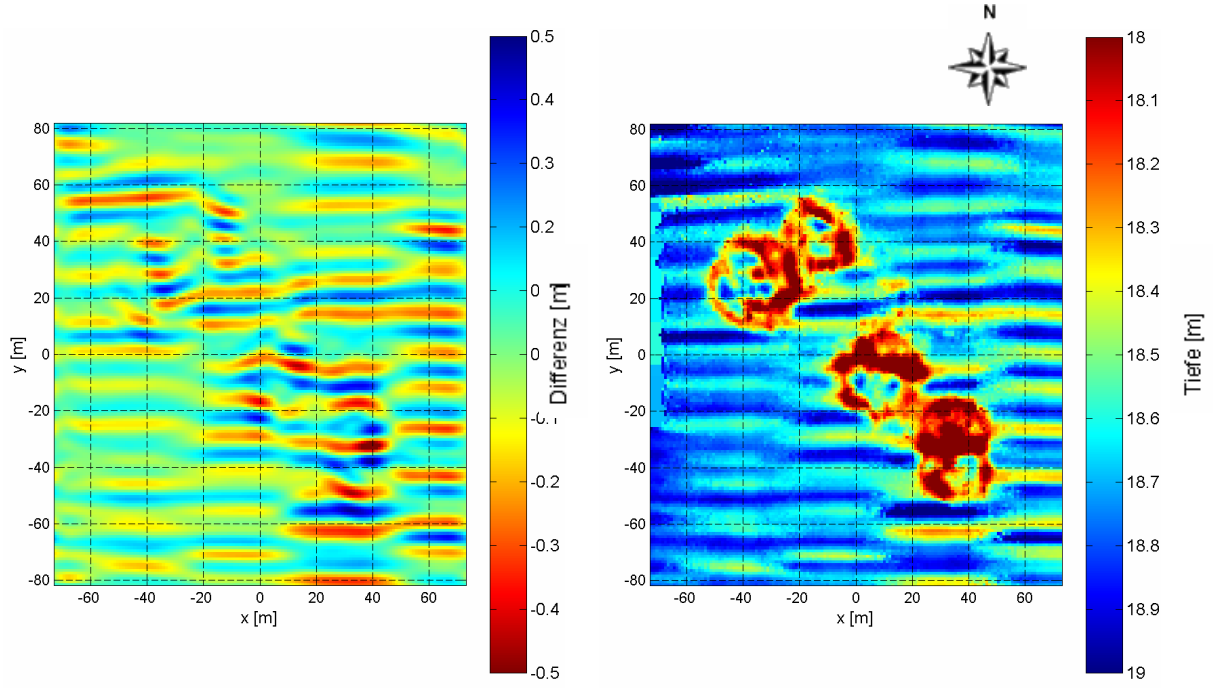


Abbildung 44: Störstrukturen über der Mergelklappstelle.

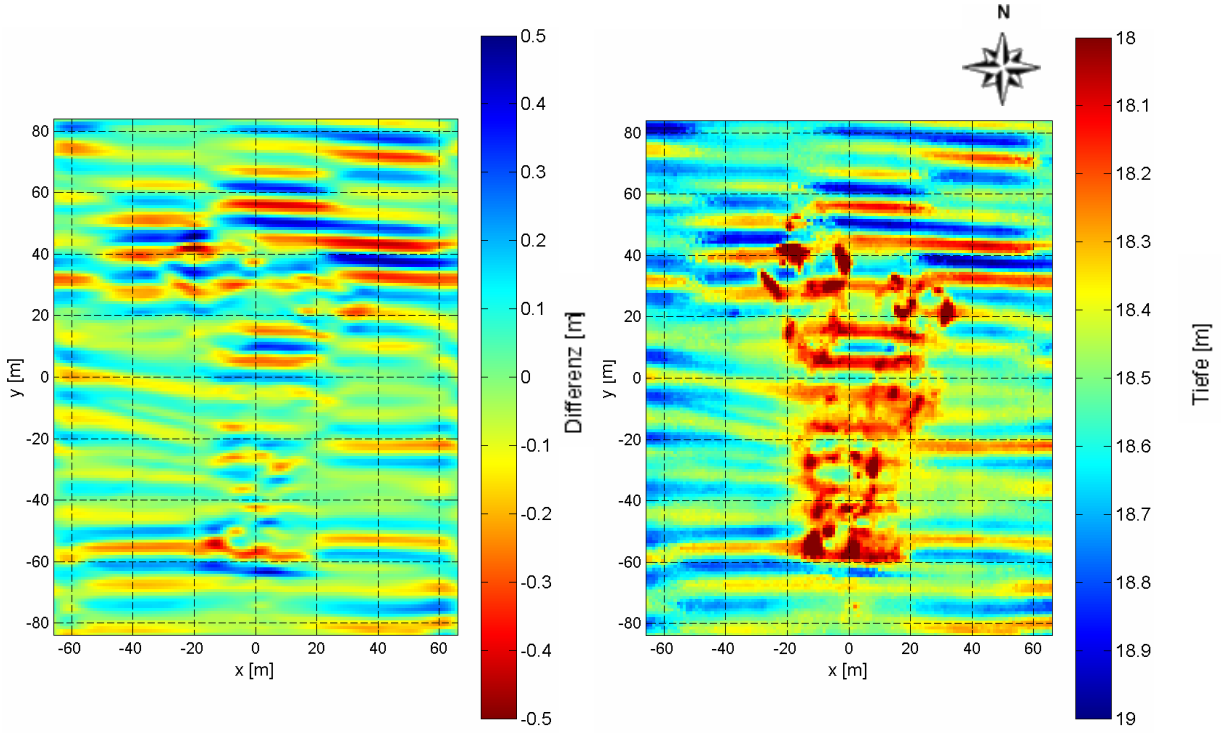


Abbildung 45: Störstrukturen über der Mischbodenklappstelle.

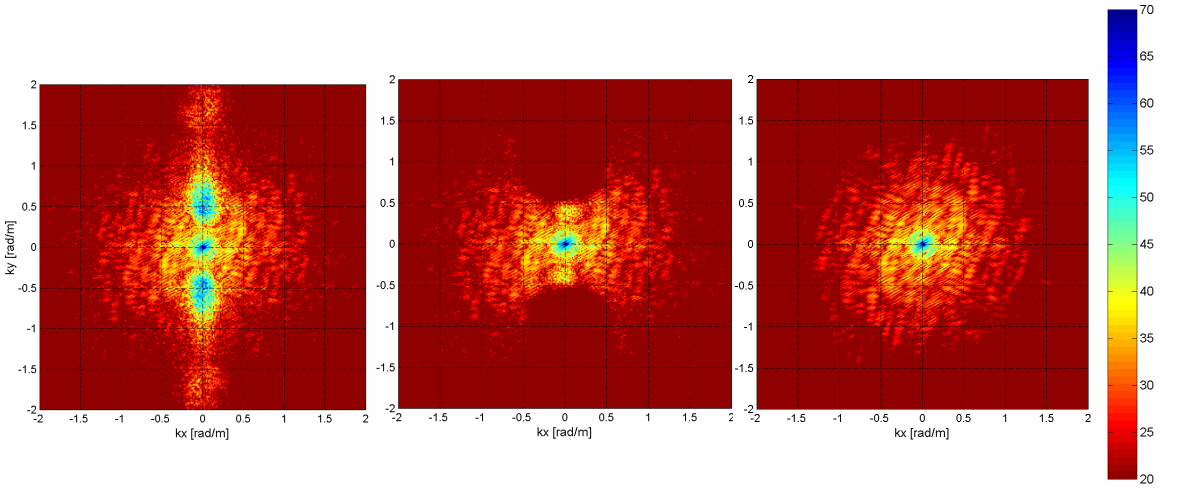


Abbildung 46: Wellenzahlspektrum des gesamten Messgebietes, links – Juni 2001 unkorrigiert, Mitte – Juni 2001 nach der Korrektur, rechts – August 2001.

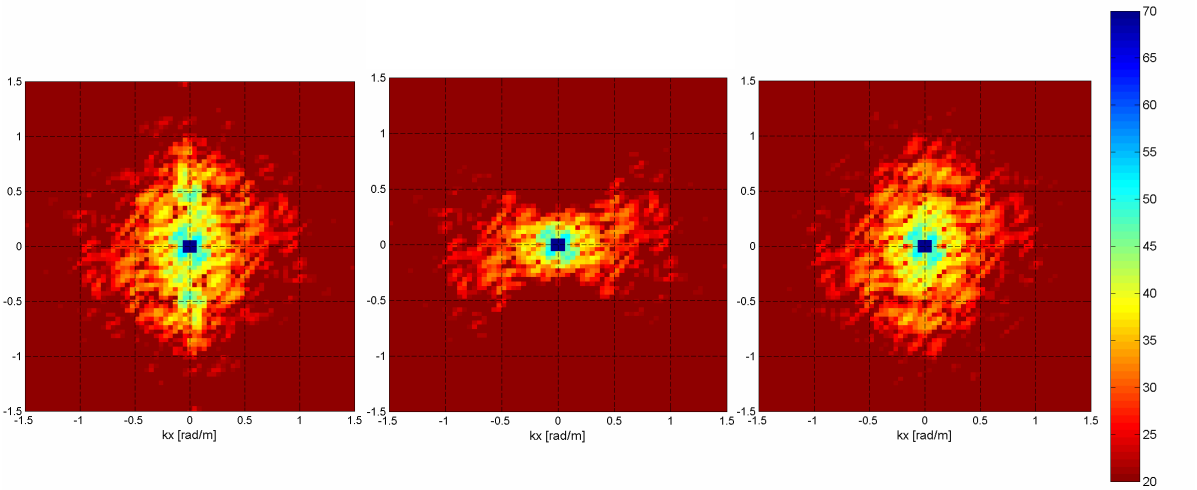


Abbildung 47: Wellenzahlspektrum der Mergelklappstelle, links – Juni 2001 unkorrigiert, Mitte – Juni 2001 nach der Korrektur, rechts – August 2001.

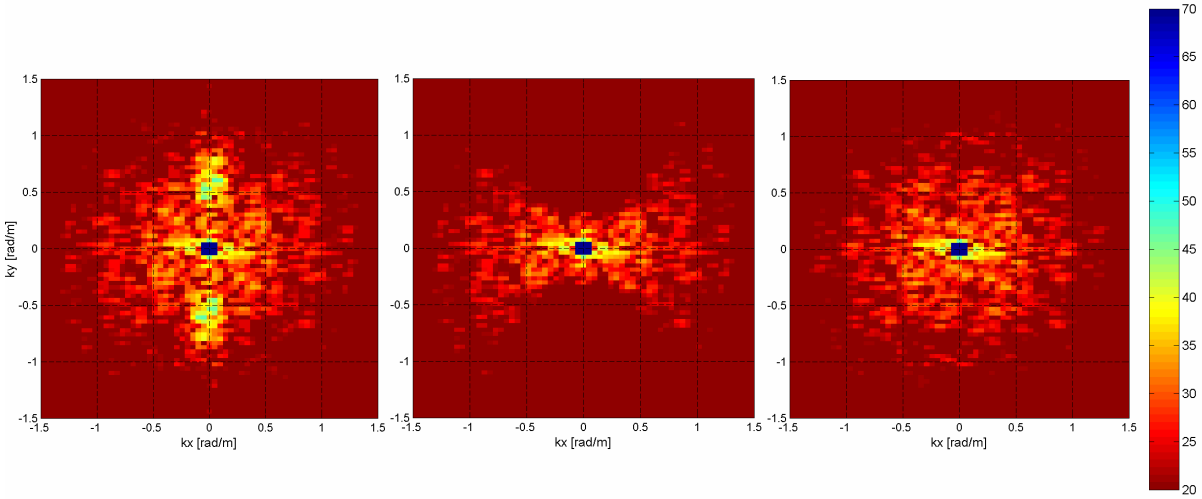


Abbildung 48: Wellenzahlspektrum der Mischbodenklappstelle, links – Juni 2001 unkorrigiert, Mitte – Juni 2001 nach der Korrektur, rechts – August 2001.

Deshalb ist die Genauigkeit aller Messungen, bei denen periodische Störstrukturen auftraten ungenügend für weitere Untersuchungen (*siehe Abbildungen 49 und 50*). Dies betrifft die Messung vom Juni 2001 und die WO-Linien der Messung vom Oktober 2002.

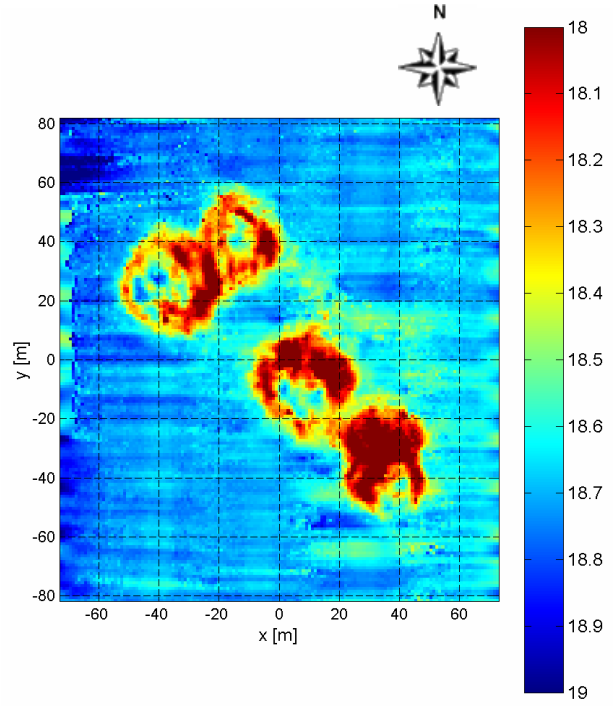


Abbildung 49: Mergelklappstelle Juni 2001, korrigiert.

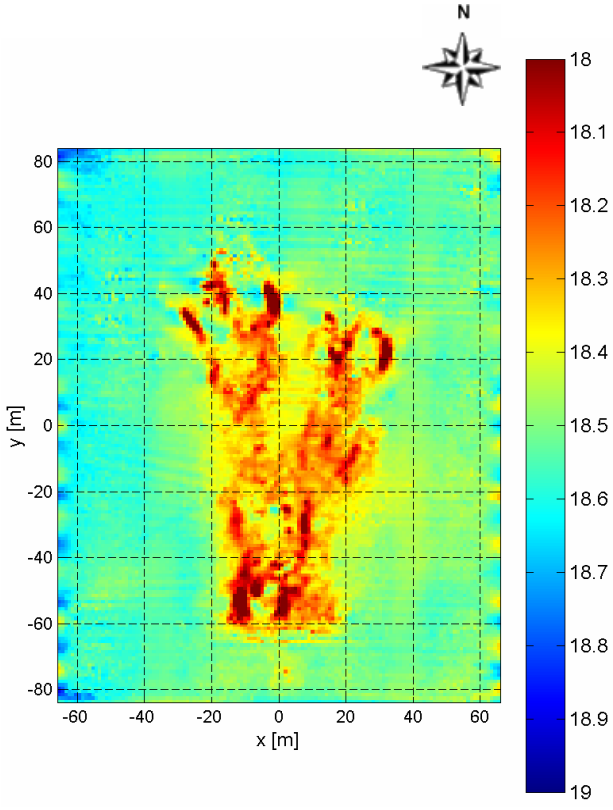


Abbildung 50: Mischbodenklappstelle Juni 2001, korrigiert.

Bei der Messkampagne im Oktober 2002 traten zusätzlich zu dem Offset über dem gesamten Gebiet Offsets zwischen den einzelnen Schiffslinien auf. Diese Fehler können nicht auf die falsche Messung einer Komponente des Fächerecholotsystems zurückgeführt werden. Sie entstanden wahrscheinlich ebenfalls durch einen Fehler im Computersystem bei der Zusammenstellung der Daten. Die Offsets zwischen den einzelnen Schiffslinien waren der Grund dafür, dass auch die NS-Schiffslinien der Messung von Oktober 2002 bei der Auswertung nicht berücksichtigt werden konnten.

Aufgrund dieser Fehlerquellen war die Genauigkeit der Messungen von Juni 2001 und Oktober 2002 für die weitere Auswertung nicht ausreichend. Für die Untersuchung der morphologischen Veränderungen über der Verklappungsstelle wurden deshalb nur die Messungen von August 2001 und Oktober 2003 herangezogen.

5 Auswertungsmethoden

5.1 Berechnung der Wandbreite der kraterartigen Mergelstrukturen

Bei der Verklappung der Mergelstrukturen bildeten sich ringförmige Kraterstrukturen aus. Eine Möglichkeit diese Strukturen zu beschreiben ist die mittlere Breite der Kraterwände.
Zur Untersuchung der Kraterwände wurden in einem sternförmigen Muster (*siehe Abbildung 51*) Profile über die Krater gelegt.

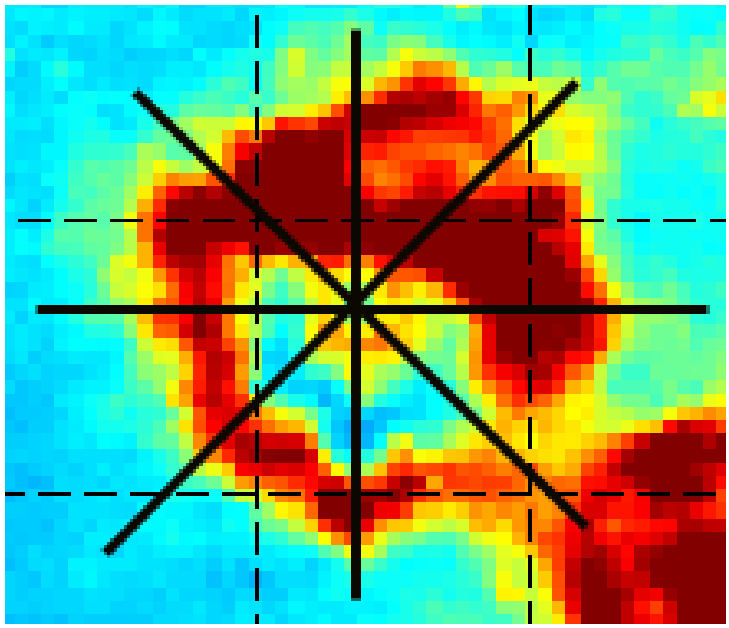


Abbildung 51:
Sternförmige Profilauswahl zur Bestimmung der Breite der Kraterwände über Krater Nr. 3.

Diese Profilschnitte werden mit einem Polynom P(x) einstellbaren Grades n angenähert (*siehe Abbildung 52*).

$$P(x) = a_1 x^n + a_2 x^{n-1} + a_3 x^{n-2} + \ldots + a_n x^1 + T$$

Dieses Polynom wird in einer vom Nutzer bestimmbaren Schrittweite t entlang der Tiefenachse verschoben.

$$P_j(x) = a_1 x^n + a_2 x^{n-1} + a_3 x^{n-2} + \ldots + a_n x^1 + T - jt$$

Für jedes Polynom $P_j(x)$ werden die Nullstellen berechnet. Diese Nullstellen stellen die Begrenzungen der Kraterwände in jeder Tiefe dar. Durch eine Berechnung der Nullstellen in jeder Tiefe können die Abstände der Nullstellen und damit die Wandbreite der Krater ermittelt werden. Dabei werden Ergebnisse mit mehr oder weniger

als zwei Nullstellen nicht mit berücksichtigt (*siehe Anhang C: Neue Module in MorphDyn©*).

Die Kraterbreite in jeder Höhe ergibt sich aus einem gemittelten Wert über alle Profilschnitte.

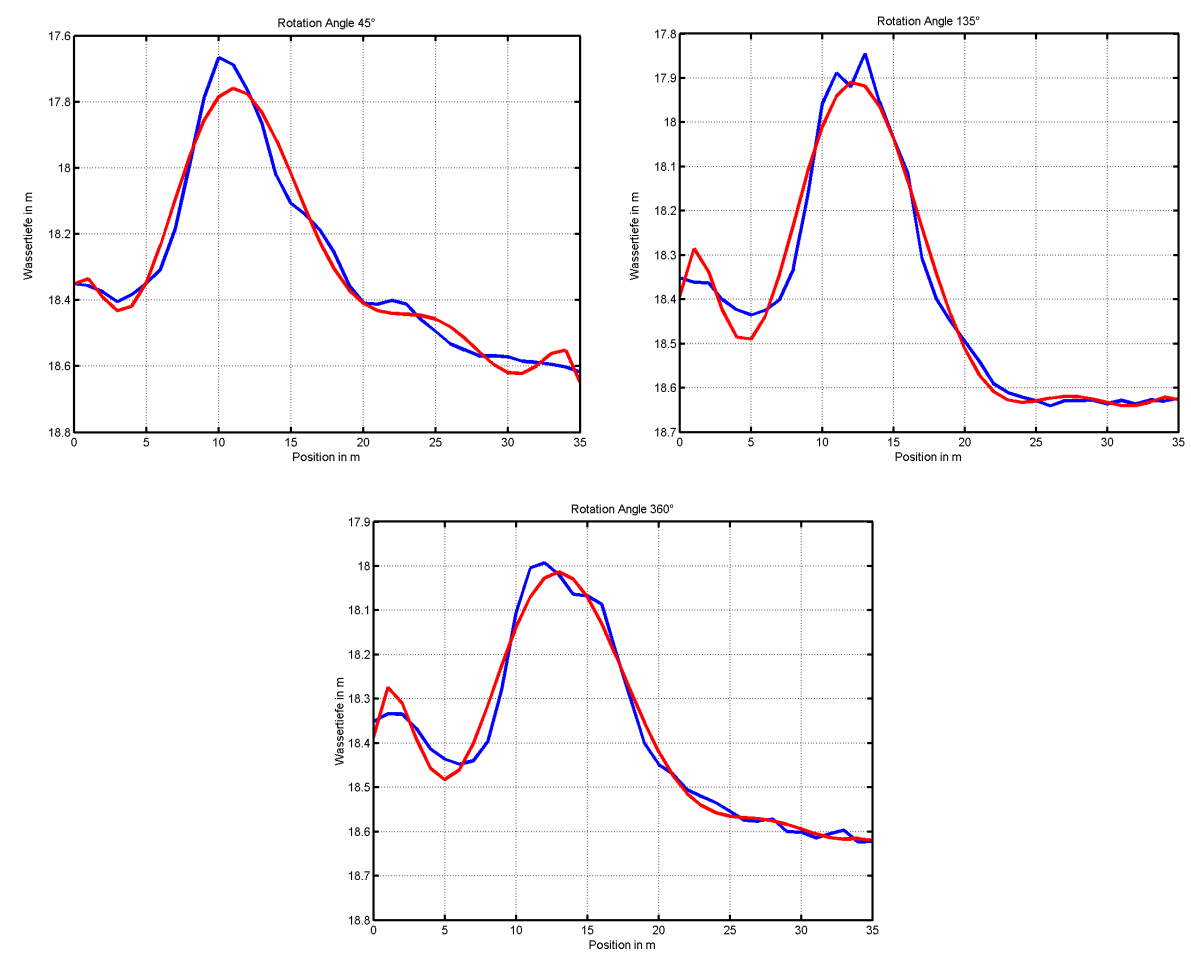


Abbildung 52: Profilschnitt (blau) und angenähertes Polynom 8. Grades (rot), Mergelkrater Nr. 3, August 2001.

5.2 Volumenuntersuchungen

Zur Darstellung des verlagerten Volumens auf den Klappstellen wurden drei Einzelauswertungen durchgeführt. Zuerst wurden Differenzbilder erstellt, um einen Überblick über Zu- und Abnahmen des Volumens zu schaffen. Dann wurden die absoluten Volumenbilanzen berechnet. Zuletzt wurde eine tiefenabhängige Volumenuntersuchung durchgeführt, um die Volumenänderungen konkreten Bereichen auf der Karte und in der Tiefe zuordnen zu können.

Differenzbilder

Die Differenzbilder entstanden durch die Subtraktion der Tiefenwerte in den Gitterpunkten der Geländemodelle zweier Messkampagnen.

$$\Delta T = T_{Aug\,01} - T_{Okt\,03}$$

Absolute Volumenbilanzen

Die Berechnung der absoluten Volumenveränderungen erfolgte nicht mit Hilfe der Originalreferenzfläche, weil die Nullmessung aufgrund der Wetterverhältnisse abgebrochen werden musste. Stattdessen wurden die Werte im Vergleich zu einer glatten horizontalen Referenzfläche in einer Tiefe von 18,7 m berechnet.

$$V = r^2 \sum_i 18{,}7 - T_i$$

V: Gesamtvolumen

T_i: Tiefenwerte des Gitters

r: Gittergröße, Länge der Gitterzellenkante.

Eine Tiefe von 18,7 m wurde für die Ebene angenommen, weil die mittlere Tiefe der ebenen Flächen des übermessenen Gebietes bei 18,7 m lag. Da bei dieser Auswertung nur die Volumendifferenzen zwischen zwei Messungen von Interesse waren, hätte die Tiefe dieser Ebene beliebig gewählt werden können.

Tiefenabhängige Volumenuntersuchung

Bei der tiefenabhängigen Volumenuntersuchung werden in verschiedenen Tiefen waagerechte Ebenen durch die Strukturen gelegt (*siehe Abbildung 53*).

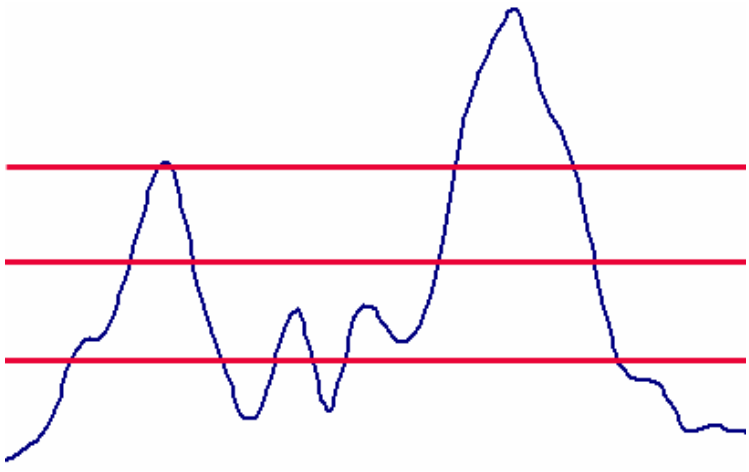


Abbildung 53: Schnittebenen für tiefenabhängige Volumendarstellung.

Die absoluten Schnittflächen der Ebenen in jeder Tiefe werden berechnet und über der Tiefe dargestellt (*siehe Abbildung 54*).

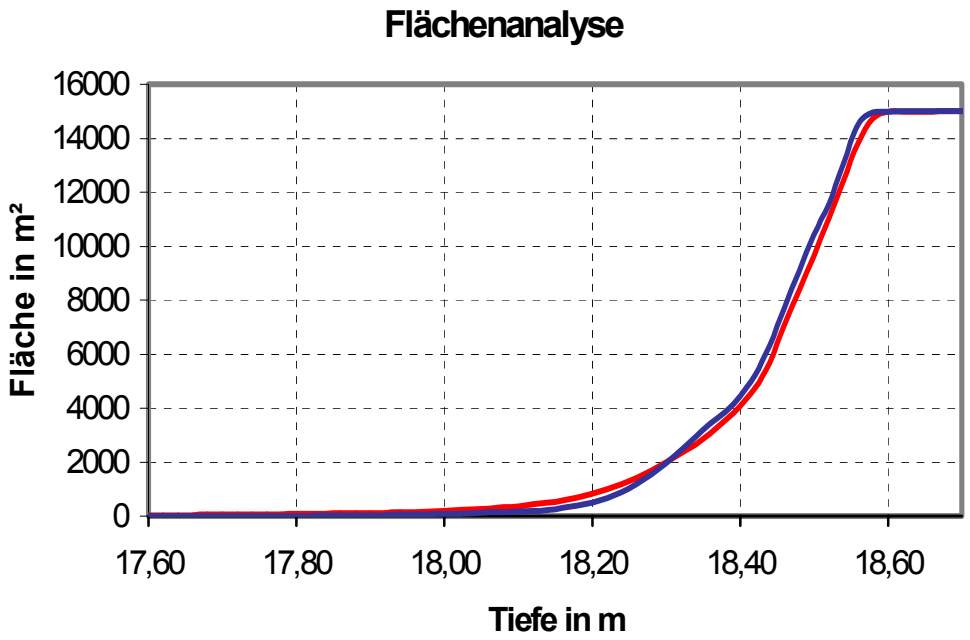


Abbildung 54: Schnittflächen über die Tiefe, Mischbodenklappstelle, August 2001 (rot), Oktober 2003 (blau).

Wird die Differenz von zwei Flächendarstellungen aus verschiedenen Zeiten gebildet, können Volumenzu- und -abnahmen ganz bestimmten Tiefen zugeordnet werden (*siehe Abbildung 55*). Positive Vorzeichen bedeuten dabei eine Volumenzunahme, negative eine Volumenabnahme.

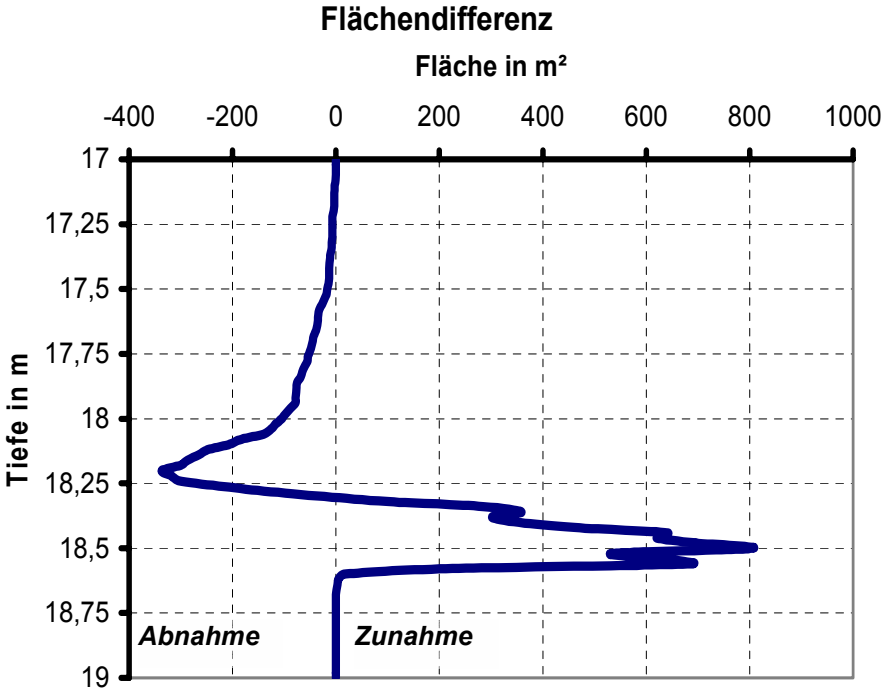


Abbildung 55: Flächendifferenzen.

5.3 Untersuchung der Richtung – Optischer Fluss

Wenn bei der Untersuchung des Volumens eine Veränderung festgestellt wird, muss festgestellt werden, in welcher Form die Volumenveränderung zustande kam. Wenn ein Materialtransport stattgefunden hat, könnte sich aufgrund küstennaher Strömungen eine Vorzugsrichtung der Materialbewegung ausgebildet haben. Eine solche Bewegungsrichtung lässt sich in der Bildverarbeitung mit Hilfe des optischen Flusses zwischen zwei Bildern bestimmen [16,17,18].

Durchführung

Wenn es auf einer Reihe von Bildern für eine Anzahl von Objekten eine Bewegungsrichtung gibt, bleiben die Grauwerte g_{XY} der betrachteten Objekte im Bild in Bewegungsrichtung erhalten (*siehe Abbildung 56*).



Abbildung 56:

Hafeneinfahrt von Warnemünde [19]. Die Grauwerte von bewegten Objekten auf Bildern bleiben in Bewegungsrichtung erhalten: → Im Beispiel sind die Grauwerte des Bildes nahezu konstant. Die einzige Veränderung ist die Bewegung des Schiffes. Die Grauwerte des Schiffes selbst sind auch unverändert – sie bleiben also in Bewegungsrichtung erhalten.

Wenn die Grauwerte g_{XY} im Bild in Bewegungsrichtung erhalten bleiben, ist der raumzeitliche Gradient senkrecht zur Bewegungsrichtung und das Skalarprodukt verschwindet.

$$\nabla_{xt} g = \left[\frac{\partial g}{\partial x}, \frac{\partial g}{\partial y}, \frac{\partial g}{\partial t} \right]^T \perp \vec{n} = [u, v, t]^T$$

$$\nabla_{xt} g^T \vec{n} = \frac{\partial g}{\partial x} u + \frac{\partial g}{\partial y} v + \frac{\partial g}{\partial t} t = 0$$

Da bei der Untersuchung der Seebodenveränderungen nur je zwei Bilder miteinander verglichen wurden, wurde die Zeit mit t = 1 definiert.
Mit der Annahme, dass die Grauwerte in Bewegungsrichtung erhalten bleiben, ergibt sich die Kontinuitätsgleichung für den optischen Fluss wie folgt.

$$\nabla_x g^T \vec{u} + g_t = 0 \qquad \vec{u} = [u, v]$$

Normalerweise sind jedoch veränderliche Grauwertbedingungen aufgrund von Rauschen, unterschiedlichen Intensitäten oder starken Formveränderungen der zu betrachtenden Objekte vorhanden, so dass die Annahme von der Konstanz der Grauwerte verletzt wird (*siehe Abbildungen 57–59)*.



Abbildung 57: Veränderliche Grauwertbedingungen durch unterschiedliche Rauschverhältnisse [19].



Abbildung 58: Veränderliche Grauwertbedingungen durch unterschiedliche Lichtverhältnisse/ Intensitäten [19].



Abbildung 59: Veränderliche Grauwertbedingungen durch bewegungsunabhängige Formveränderungen [19].

Solche Abweichungen können mit Hilfe des Variationsansatzes durch die Minimierung eines Fehlerfunktionals optimiert werden.

$$\int w(x'-x,t'-t)\left\|\nabla_x g^T \vec{u} + g_t\right\| d^T x' dt' \rightarrow \min$$

$$\left\|\overline{\nabla_x g^T \vec{u} + g_t}\right\| = \left\|\overline{\nabla_{xt} g^T \vec{n}}\right\| \rightarrow \min$$

Unter Benutzung der L_2 Norm:

$$\|a\|_2 = \sqrt{\lambda\left(a^T a\right)}$$

erhält man:

$$\vec{n}^T \overline{\nabla_{xt} g \nabla_{xt} g^T} \vec{n} \rightarrow \min$$

Die Lösung des Variationsansatzes ist der kleinste Eigenwert des Strukturtensors.

$$\overline{\nabla_{xt} g \nabla_{xt} g^T} = \begin{bmatrix} \overline{g^2{}_x} & \overline{g_x g_y} & \overline{g_x g_t} \\ \overline{g_x g_y} & \overline{g^2{}_y} & \overline{g_y g_t} \\ \overline{g_x g_t} & \overline{g_y g_t} & \overline{g^2{}_t} \end{bmatrix}$$

Um Richtung und Geschwindigkeit der Bewegung der zu untersuchenden Objekte auf dem Bild feststellen zu können, wird eine Koordinatentransformation durch ein Diagonalisieren des Strukturtensors durchgeführt.

$$\begin{bmatrix} \overline{g^2{}_{x'}} & 0 & 0 \\ 0 & \overline{g^2{}_{y'}} & 0 \\ 0 & 0 & \overline{g^2{}_{t'}} \end{bmatrix}$$

Tabelle 4: Mögliche Lösungen der Eigenwerte und ihre Bedeutung.

Lösungen	Bedeutung
$\overline{g^2_{t'}} = \overline{g^2_{x'}} = \overline{g^2_{y'}} = 0$	Konstanter Grauwert
$\overline{g^2_{t'}} = \overline{g^2_{y'}} = 0$	Konstante Bewegung an einer Kante
$\overline{g^2_{t'}} = 0$	Konstante Bewegung
$Alle \neq 0$	Bewegungsdiskontinuität

Die Summe aus den Eigenwerten der diagonalisierten Matrix wird auch „Trace“ T genannt [16].

$$T = \overline{g^2_{t'}} + \overline{g^2_{x'}} + \overline{g^2_{y'}}$$

Der Trace-Wert ist ein Maß für die Stärke der Bewegung. Je höher der Trace-Wert, desto größer ist die Bewegung. Mit der Angabe eines Trace-Wertes vor der Berechnung des optischen Flusses mit MorphDyn© können Bewegungen unterhalb dieses Grenzwertes vernachlässigt werden. Auf diese Weise können Ergebnisse, die nur durch ein Rauschen oder eine leichte Höhenveränderung der Verklappungsstrukturen zustande kommen, ausgeschlossen werden.

5.4 Untersuchung der Rauhigkeit – Varianz der Laplace-Pyramide

Die Rauhigkeit einer Oberfläche ist immer von der Auflösung und Skalierungsgröße, in der sie betrachtet wird, abhängig. Eine Möglichkeit die Karten in verschiedenen Skalierungsgrößen darstellen zu können ist die Erstellung einer Laplace-Pyramide [20]. Dabei entsteht eine Serie von Bildern, die jeweils nur Strukturen einer bestimmten Größenordnung enthalten. Von jedem dieser Bilder wird dann die durchschnittliche Amplitude der Strukturen (Varianz) berechnet, so erhält man die mittlere Höhe der Strukturen als Maß für die Rauhigkeit in Abhängigkeit von ihrer Skalierungsgröße [16,17].

Durchführung

Zuerst wird eine Gauß-Pyramide $G^{(n+1)}$ des Bildes erstellt.

$$G^{(n+1)} = (B^4)^{(n+1)}(\Downarrow B^4)^{(n)} G^{(n)}$$

Dazu wird das Originalbild $G^{(0)}$ erst mit einem B^4-Filter geglättet.

$$B^4 = \frac{1}{16}\begin{bmatrix}1 & 4 & 6 & 4 & 1\end{bmatrix}$$

Dies geschieht durch die Hintereinanderausführung zweier Faltungen der Bildmatrix mit dem B^4-Filter einmal in x- und einmal in y-Richtung. Danach werden durch eine Unterabtastung $\Downarrow$ kleinere Frequenzen aus dem Originalbild herausgefiltert, indem in x- und in y-Richtung nur jeder zweite Bildpunkt ausgewählt wird. Das Ergebnis $G^{(1)}$ (Gauß-Pyramide, Level 1) ist ein Bild, welches kleinere Strukturen nicht mehr zeigt und nur noch ein Viertel der ursprünglichen Bildpunkte enthält. Nach der Unterabtastung erfolgt eine weitere Glättung mit dem B^4-Filter.

Für Level 2 der Gauß-Pyramide wird der Vorgang mit dem $G^{(1)}$-Bild wiederholt.

Bei den Bildern der Gauß-Pyramide werden mit zunehmender Pyramidenlevel zunehmende Wellenlängen bzw. größere Strukturen herausgefiltert (*s. Abbildung 60)*.

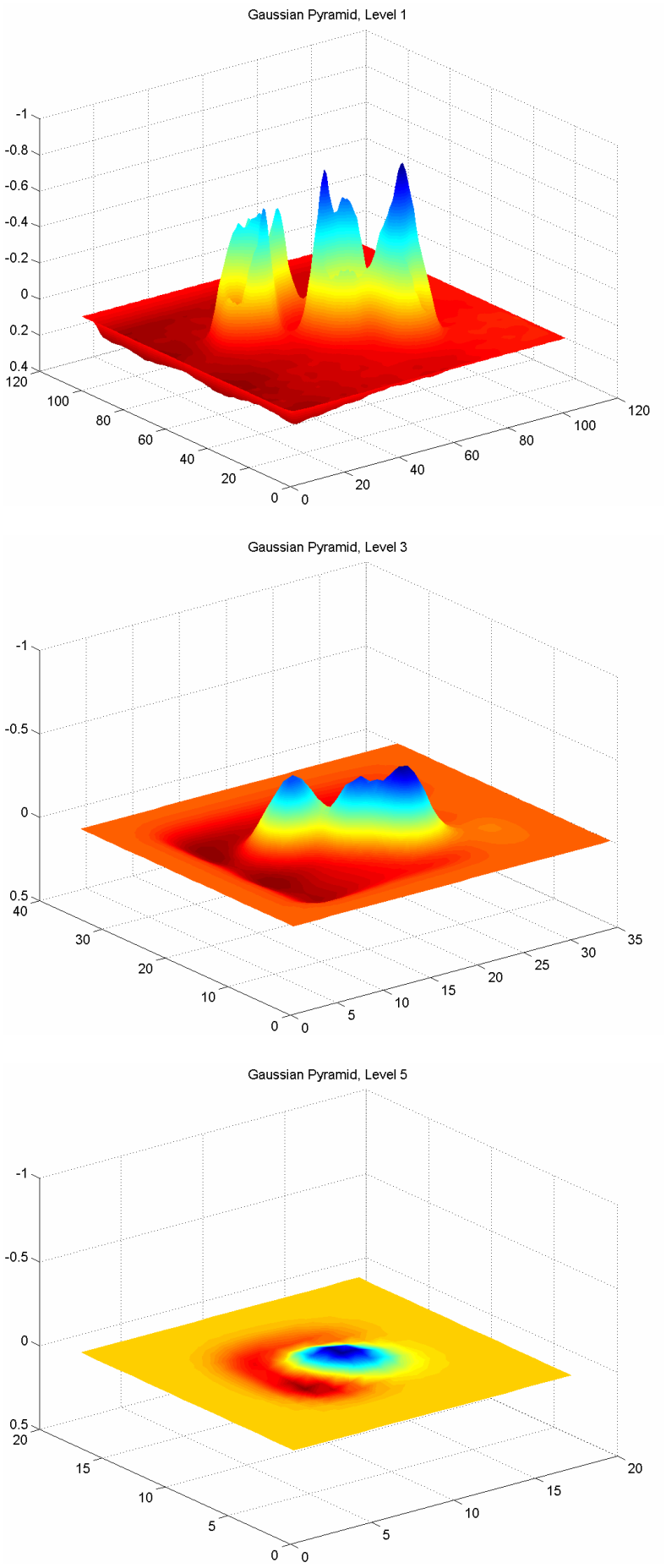


Abbildung 60: Gauß-Pyramidenstufen über dem Mergelklappgebiet.

Um die Rauhigkeit in verschiedenen Skalengrößen untersuchen zu können, ist eine Bilderserie notwendig, die jeweils nur die Strukturen aus einem bestimmten Wellenlängenbereich enthält. Dazu wird die Laplace-Pyramide $L^{(n)}$ des Bildes erstellt.

$$L^{(n)} = G^{(n)} - \Uparrow^{(n+1)} G^{(n+1)}$$

Die Laplace- Pyramide entsteht aus der Differenz der Stufen der Gauß-Pyramide. Da die Bilder der Gauß-Pyramide nicht die gleiche Größe haben, müssen die Gauß-Bilder zuerst auf die Größe des Originalbildes zurück transformiert werden. Die Rücktransformation $\Uparrow$ erfolgt dabei durch eine bilineare Annäherung der fehlenden Bildpunkte (lineare Näherung in x- und y-Richtung).

Bei der Differenz der Bilder $G^{(n)}$ und $G^{(n+1)}$ erhält man ein Bild $L^{(n)}$, welches nur noch die Strukturen enthält, die bei der Gauß-Filterung herausgenommen wurden. Sie enthält nur noch die absoluten Höhenwerte der Verklappungsstrukturen. Die Laplace-Pyramide stellt die Strukturen des Bildes in einzelne Wellenlängenbereiche zerlegt dar, also nach der Größe sortiert (*siehe Abbildung 61 und Tabelle 5*).

Tabelle 5: Level der Laplace-Pyramide und ihre Skalierungsgröße.

Pyramidenlevel	Gittergröße des Bildes	Strukturgröße
Level 0	1-m-Raster	2–4 m
Level 1	2-m-Raster	4–8 m
Level 2	4-m-Raster	8–16 m
Level 3	8-m-Raster	16–32 m
Level 4	16-m-Raster	32–64 m
Level 5	32-m-Raster	>64 m

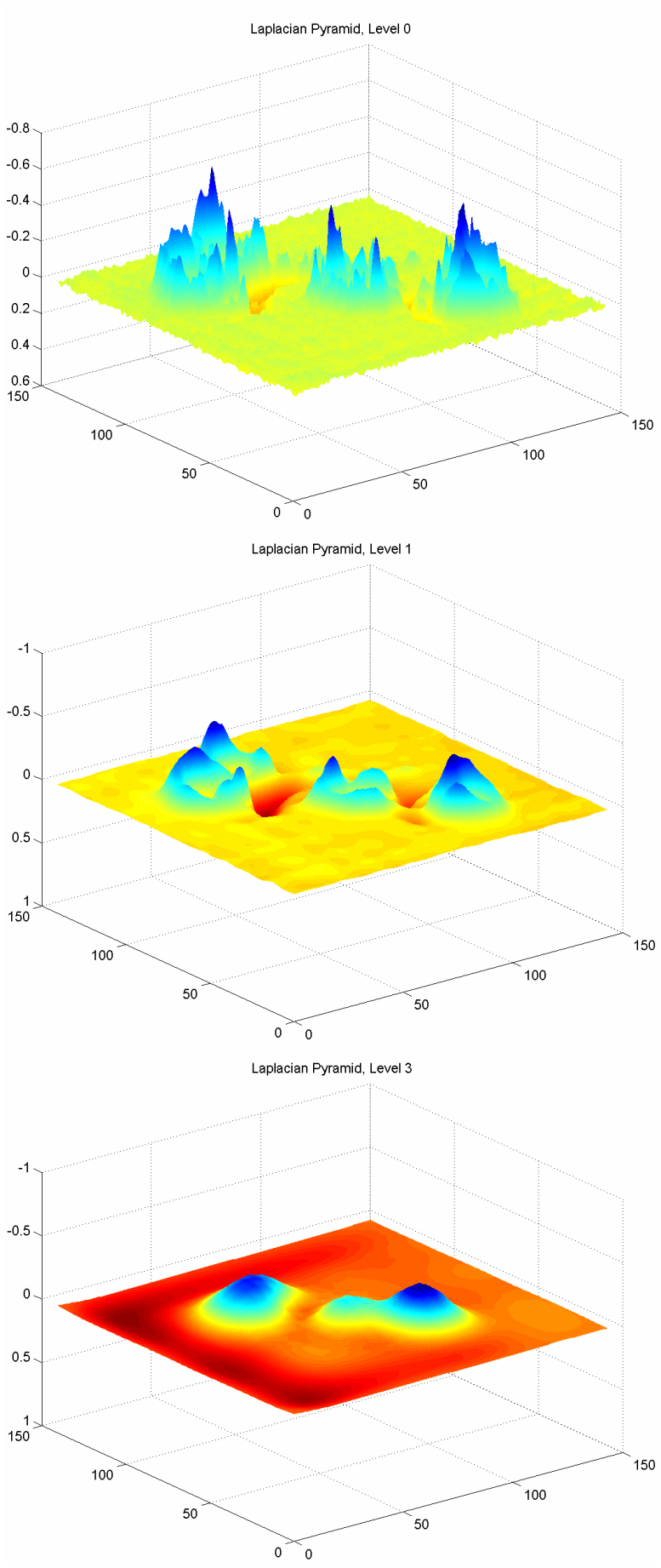


Abbildung 61: Laplace-Pyramidenstufen über dem Mergelklappgebiet.

Durch die Berechnung der Varianz V_n jeder Laplace-Pyramidenstufe kann eine Aussage über die mittlere Energie der Strukturen in jeder Größenordnung getroffen werden.

$$V_n = \left\langle g_n^2 \right\rangle = \frac{1}{N_X N_Y} \sum_{\substack{X=1:N_X \\ Y=1:N_Y}} g_{XY}{}^2$$

n: Pyramidenlevel

V_n: Varianz der Laplace-Pyramide, Level n

g_n : Grauwert des Bildes

$N_{X,Y}$: Anzahl der Werte.

6 Ergebnisse

Zur Darstellung der zeitlichen Veränderungen der Verklappungsstrukturen zwischen Juni 2001 und Oktober 2003 wurden Formparameter, wie Höhe und Breite der Strukturen, deren Volumina und die Rauhigkeit der Oberfläche im Skalenbereich von 1 m bis 64 m betrachtet. Außerdem wurde untersucht, ob kleinräumige, richtungsabhängige Materialverlagerungen stattgefunden haben.

6.1 Kartendarstellungen

Zur Untersuchung der zeitlichen Veränderung der Verklappungsstellen wurden folgende Kartenausschnitte verwendet:

Mergelklappgebiet (*siehe Abbildungen 62–65*)*:*

ce = Kennziffer 4; 493508,0788 m	
= 4493508,0788 m	Mittelkoordinaten, östlich
cn = 6008438,5624 m	Mittelkoordinaten, nördlich
rot = = -9,0097e-014°	Auslenkung im Uhrzeigersinn gegen Nord
nx = 145 m	Länge in x-Richtung
ny = 163 m	Länge in y-Richtung.

Mischbodenklappgebiet (*siehe Abbildungen 66–69):*

ce = Kennziffer 4; 493639,6169 m	
= 4493639,6169 m	Mittelkoordinaten, östlich
cn = 6008203,5972 m	Mittelkoordinaten, nördlich
rot = -4,8848e-014°	Auslenkung im Uhrzeigersinn gegen Nord
nx = 131 m	Länge in x-Richtung
ny = 167 m	Länge in y-Richtung.

Die Auswertungen erfolgten mit den Messungen von August 2001 und Oktober 2003. Sie sind in einem 1 m x 1 m-Raster dargestellt.
Die 3D-Karten sind ca. 30fach überhöht dargestellt.

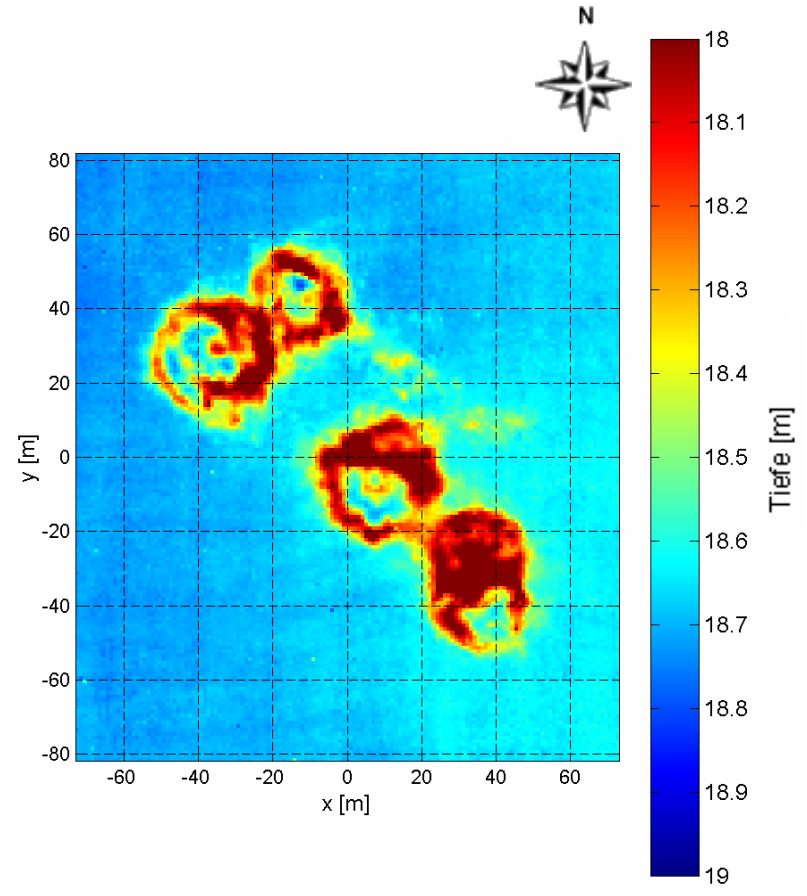


Abbildung 62: Bathymetrie der Mergelstrukturen, August 2001.

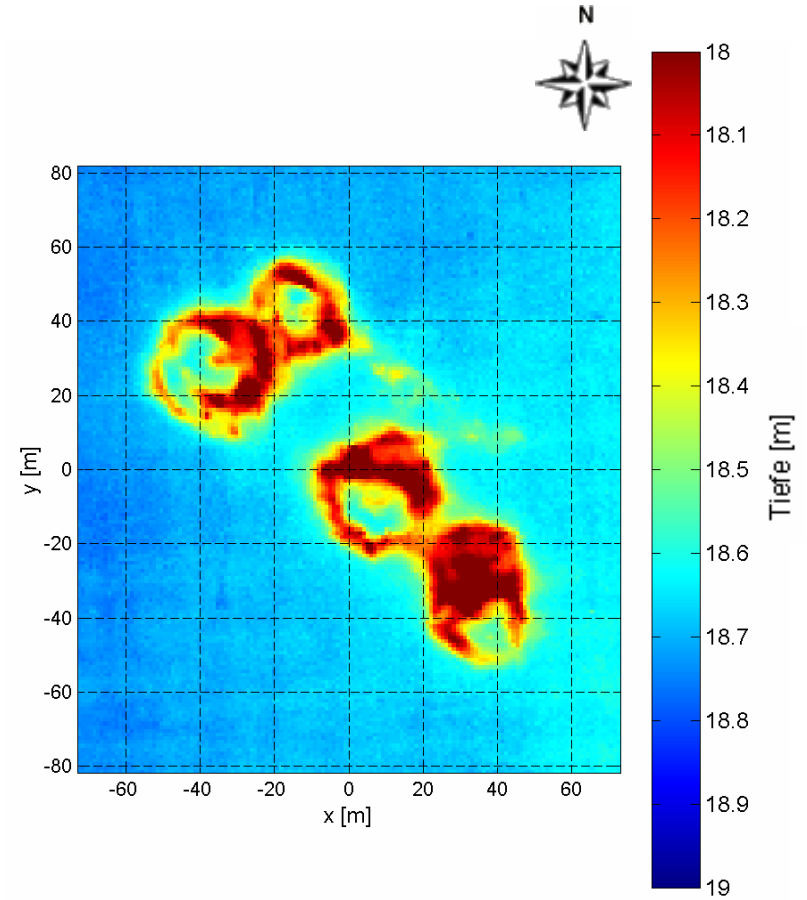


Abbildung 63: Bathymetrie der Mergelstrukturen, Oktober 2003.

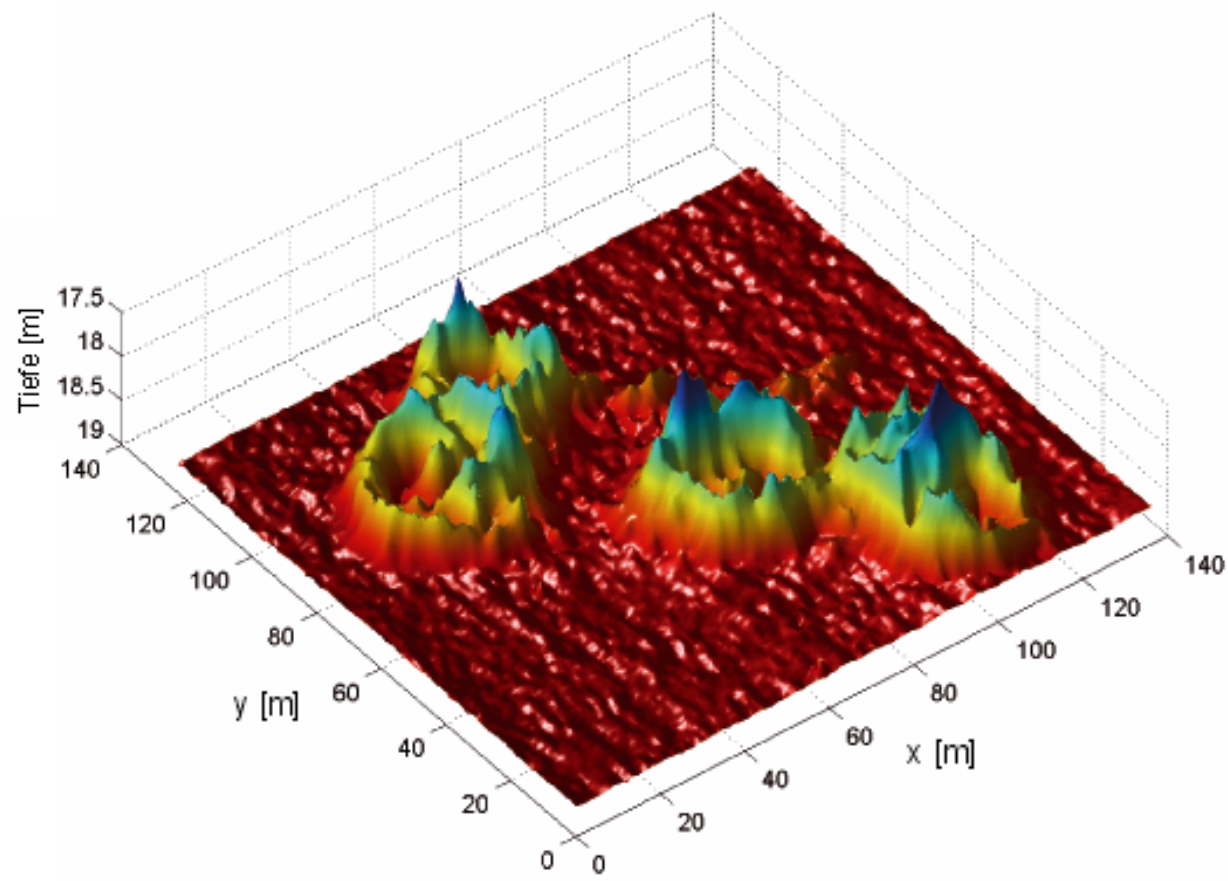


Abbildung 64: Bathymetrie der Mergelstrukturen 3D, August 2001.

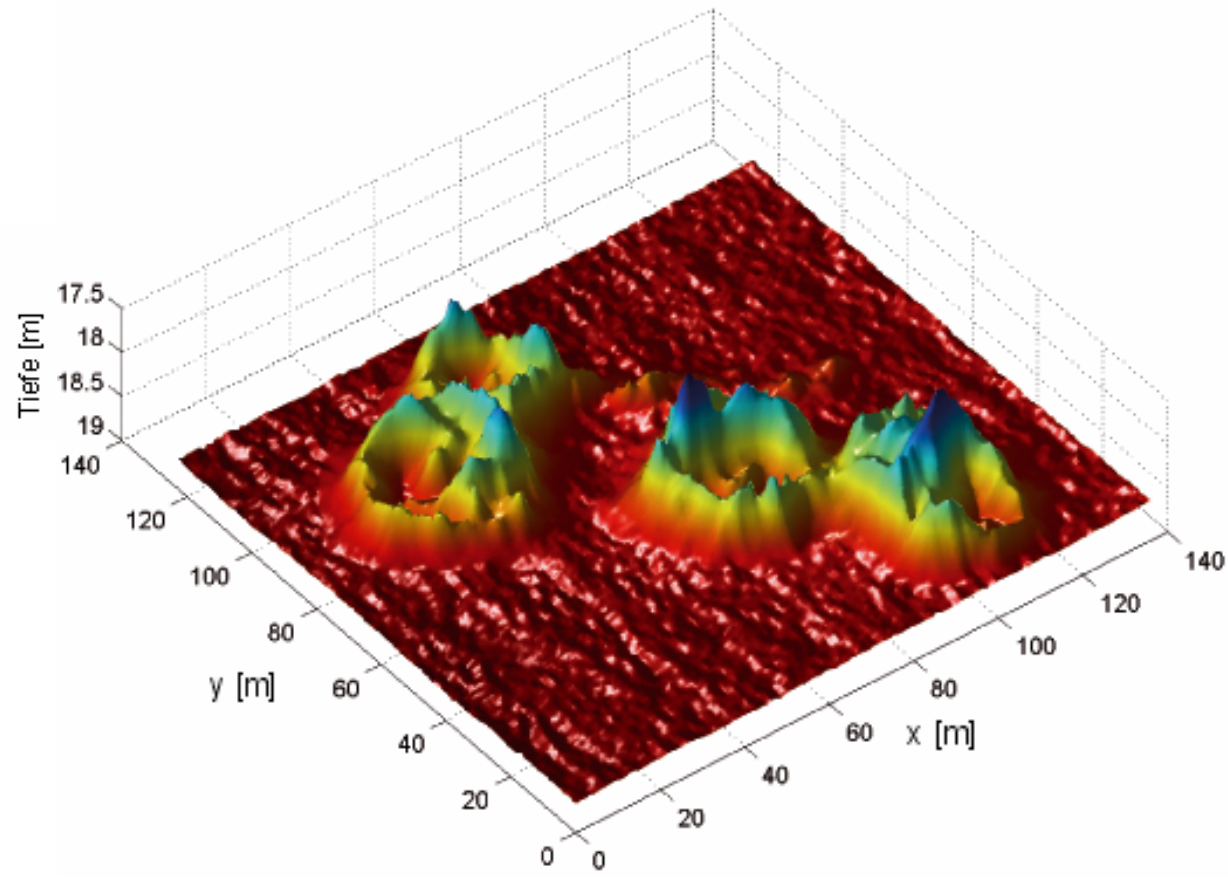


Abbildung 65: Bathymetrie der Mergelstrukturen 3D, Oktober 2003.

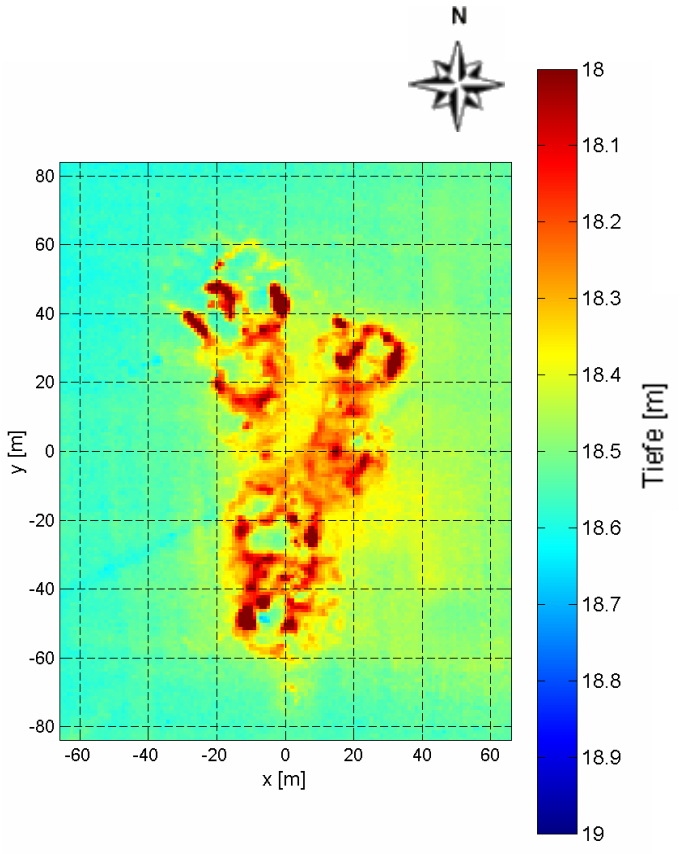


Abbildung 66: Bathymetrie der Mischbodenstrukturen, August 2001.

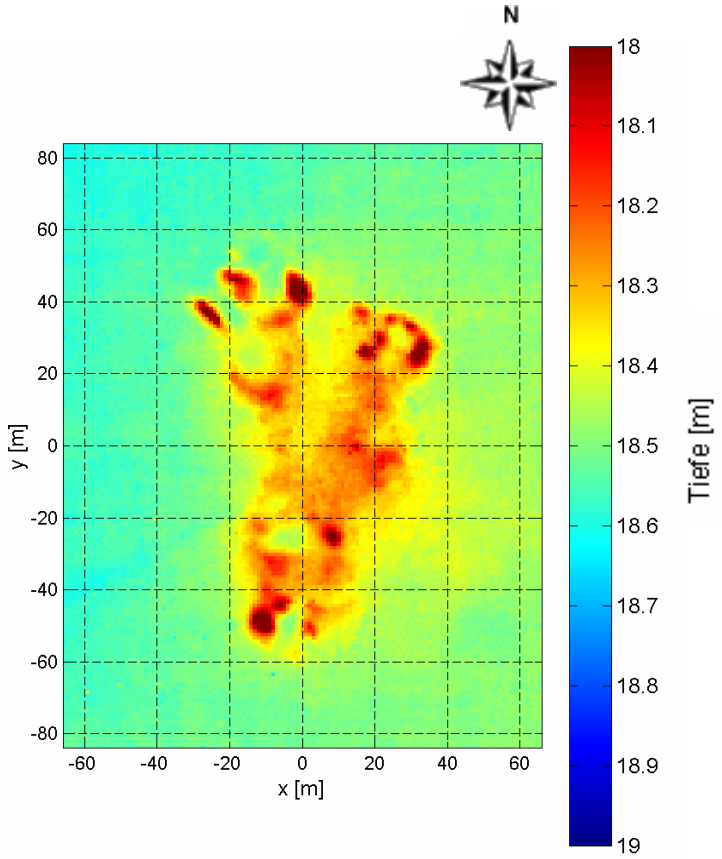


Abbildung 67: Bathymetrie der Mischbodenstrukturen, Oktober 2003.

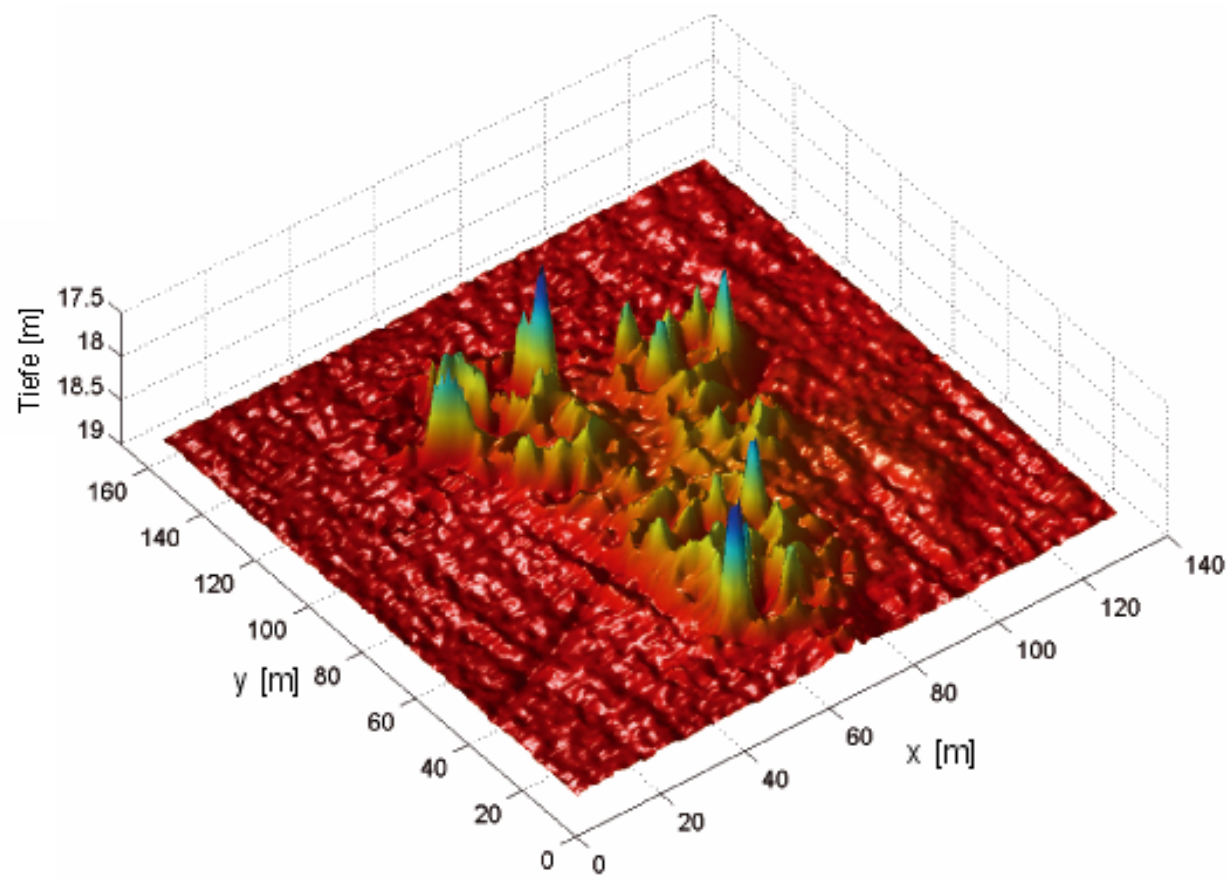


Abbildung 68: Bathymetrie der Mischbodenstrukturen 3D, August 2001.

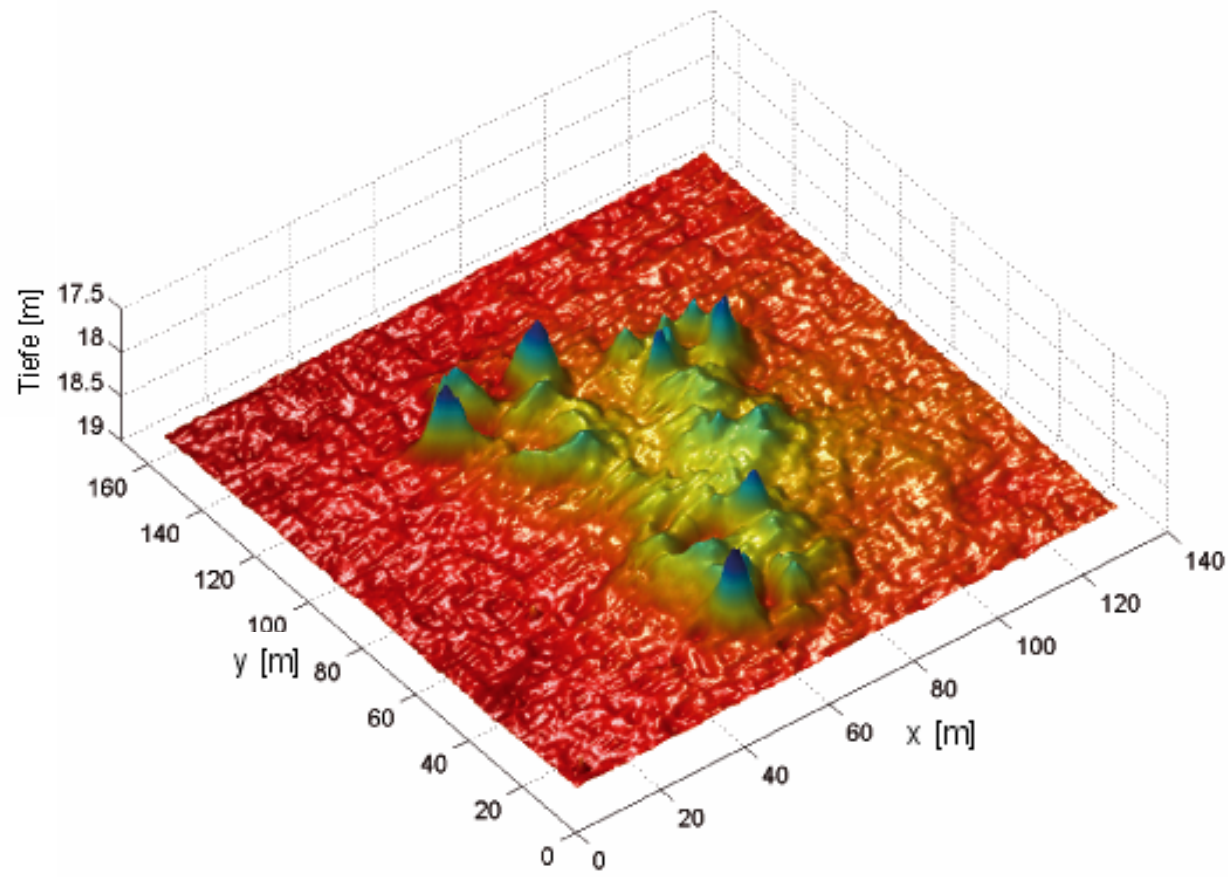


Abbildung 69: Bathymetrie der Mischbodenstrukturen 3D, Oktober 2003.

6.2 Allgemeine Abmessungen, Formparameter

6.2.1 Beschreibung der Mergelstrukturen

Die Mergelverklappungstelle weist vier ringförmige Kraterstrukturen auf. Ein erster Vergleich der Karten (*siehe Abbildungen 62 und 63*) zeigt ein Abflachen der Kraterhöhe und ein Auffüllen des Kraterinneren und der Kraterzwischenräume. Diese Veränderungen werden in einem Profilschnitt noch deutlicher (*siehe Abbildung 70*).

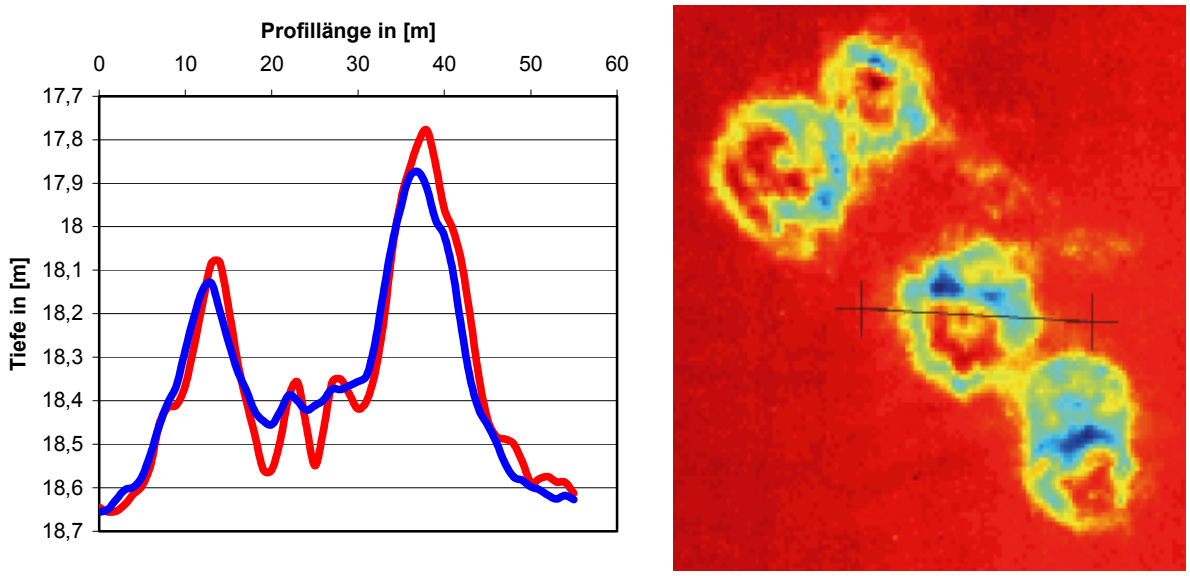


Abbildung 70: Profil über einem Mergelkrater, rot – August 2001, blau – Oktober 2003.

Weiterhin wird auf den 3D-Karten (*siehe Abbildungen 64 und 65*) sichtbar, dass sich die Wände der Krater geglättet haben.

Die Tiefenhistogramme (*s. Abbildungen 71 und 72*) stellen die Häufigkeit bestimmter Tiefenwerte auf dem ausgewählten Kartenausschnitt (*Abbildungen 62–65)* dar. Auch hier erkennt man eine geringfügige Abflachung der Mergelstrukturen. Während die Maximalhöhe der Krater im August 2001 1,58 m betrug (Minimale Tiefe der Seebodenkarte 17,22 m bei durchschnittlicher Tiefe der Umgebung 18,8 m), lag die Maximalhöhe im Oktober 2003 bei 1,45 m (Minimale Tiefe der Seebodenkarte 17,31 m). Die maximale Höhe der Strukturen hat also um bis zu 13 cm abge-nommen. Gleichzeitig hat sich die Anzahl der Gitterpunkte im Tiefenbereich von 17,9 m bis 18,6 m geringfügig erhöht.

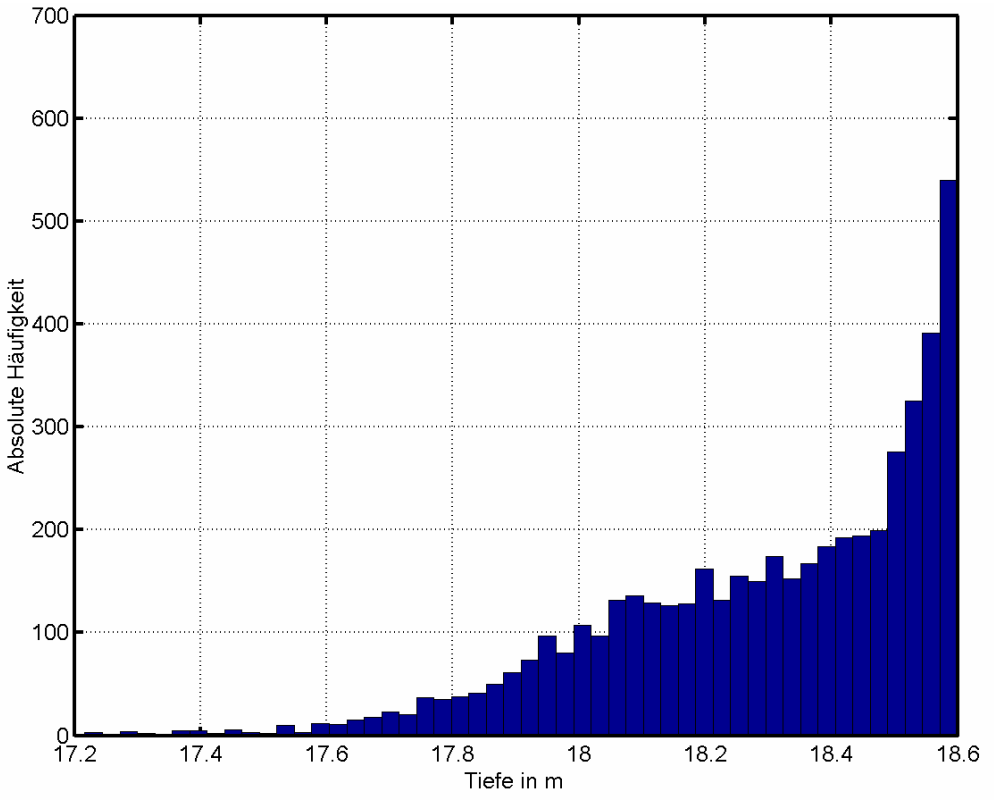


Abbildung 71: Tiefenhistogramm, Mergel, August 2001.

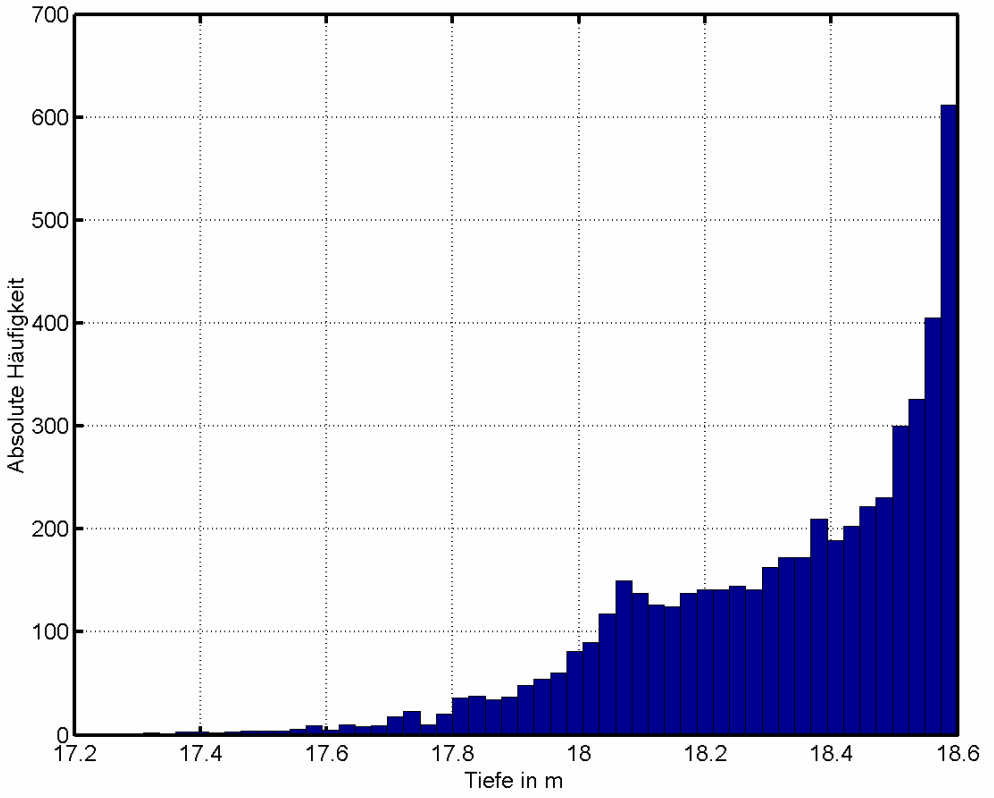


Abbildung 72: Tiefenhistogramm, Mergel, Oktober 2003.

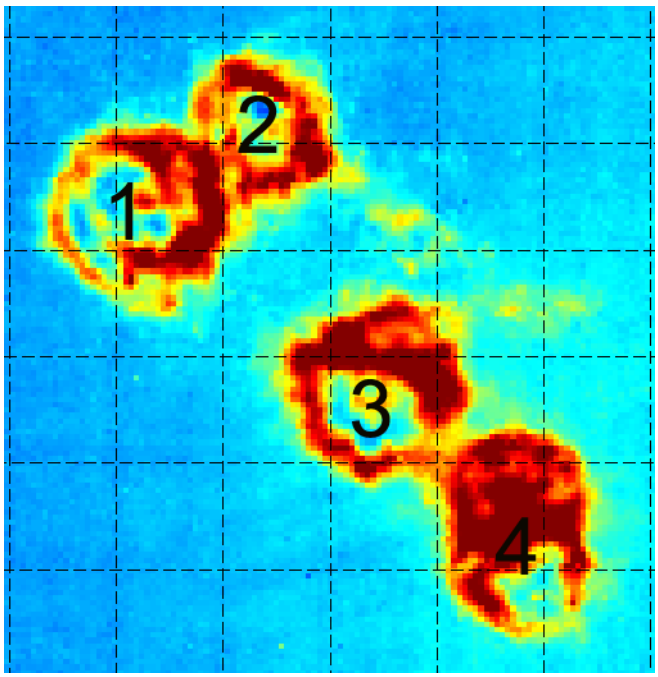


Abbildung 73: Nummerierung der Kraterstrukturen.

Zur weiteren Beschreibung der Mergelstrukturen wurde die durchschnittliche Breite der Krater untersucht. Diese Auswertung war nur bei den Kratern 2 und 3 (*siehe Abbildung 73*) und oberhalb einer Tiefe von 18,3 m möglich, da das Gebiet in größerer Tiefe und bei den Kratern 1 und 4 keine optimale Kraterform mehr aufweist. In größerer Tiefe und bei den Kratern 1 und 4 können die Nullstellen des angenäherten Polynoms (Kapitel 5.1) den Kraterwänden nicht mehr eindeutig zugeordnet werden, da auch zahlreiche Nebenmaxima existieren. Deshalb blieb der Tiefenbereich in größerer Tiefe als 18,3 m bei dieser Untersuchung unberücksichtigt. Die Parameter, die bei der Untersuchung verwendet wurden, sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Parameter für die berechete Kraterbreite.

Parameter	Werte
Winkel zwischen den Profilen	2° → 180 Profilschnitte
Länge der Profile	35 m
Grad des Polynoms	8
Schrittweite der Tiefenänderung	0,01 m

Die Darstellung der durchschnittlichen Wandstärke der Krater in Abhängigkeit von der Höhe (*siehe Abbildungen 74 und 75*) zeigt eine Abnahme der Breite von August 2001 bis Oktober 2003 in den oberen Bereichen. In den tieferen Regionen von Krater 3 ist eine Verbreiterung zu erkennen.

Aufgrund der Höhenabnahme der Krater an den Spitzen beginnen die Kurven im Oktober 2003 erst in größeren Tiefen als im August 2001. Bei Krater 2 beträgt die Differenz etwa 6 cm und bei Krater 3 handelt es sich um ca. 9 cm.

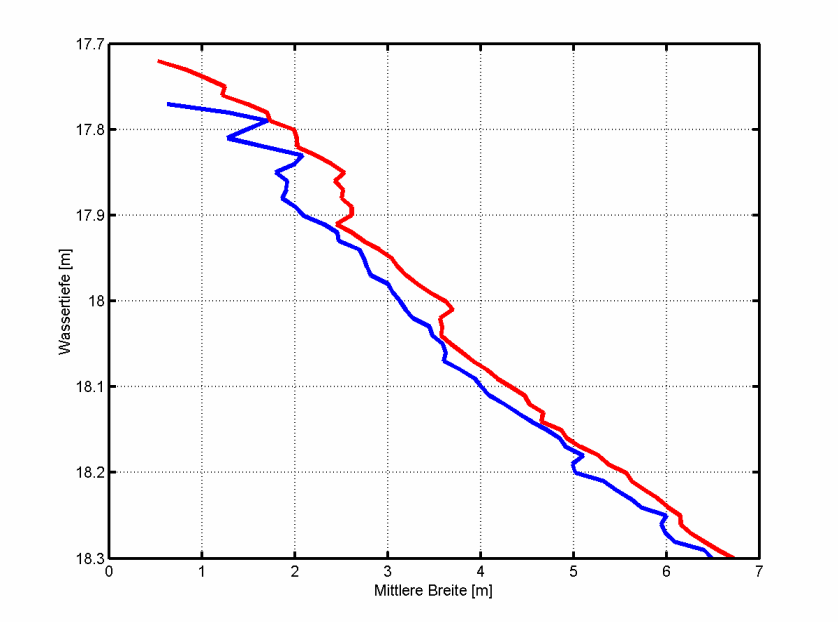


Abbildung 74: Durchschnittliche Kraterbreite, Krater 2, rot – August 2001, blau – Oktober 2003.

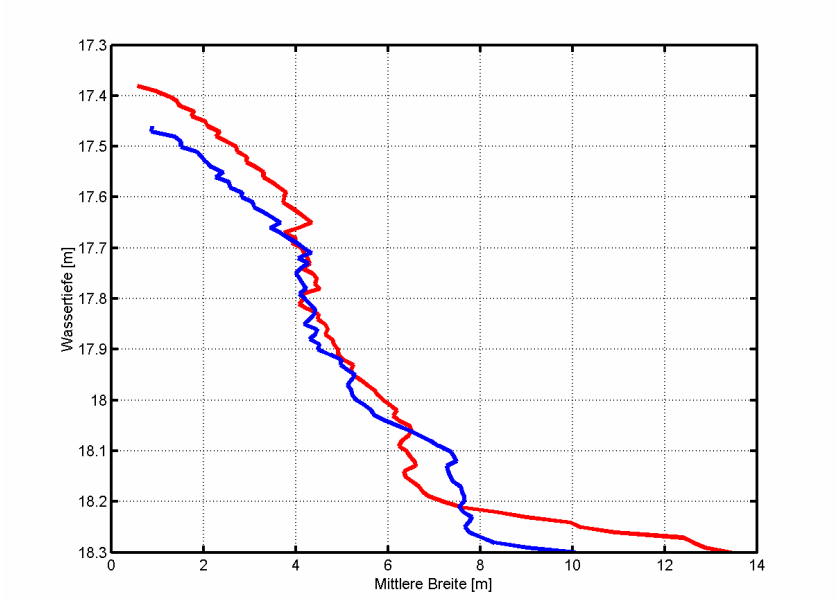


Abbildung 75: Durchschnittliche Kraterbreite, Krater 3, rot – August 2001, blau – Oktober 2003.

6.2.2 Beschreibung der Mischbodenstrukturen

Ein erster Vergleich der bathymetrischen Karten über der Mischbodenklappstelle (*siehe Abbildungen 66 und 67*) zeigt ebenfalls eine Abflachung der Mischbodenausprägungen. Außerdem sind im Oktober 2003 deutlich weniger Einzelstrukturen zu erkennen als im August 2001, d.h. größere Strukturen sind deutlich abgeflacht, und kleinere Spitzen und Täler sind zum Teil vollständig eingeebnet. Auf den 3D-Karten (*siehe Abbildungen 68 und 69)* scheint zusätzlich zum Materialabtrag an den höheren Strukturen eine Materialanlagerung in den Tälern stattgefunden zu haben, was an einem Profil durch die Klappstelle deutlich wird (*siehe Abbildung 76*). Die Spitzen sind von August 2001 bis Oktober 2003 um bis zu 45 cm abgetragen worden, während die dazwischenliegenden Senken um 10 cm aufgefüllt worden sind.

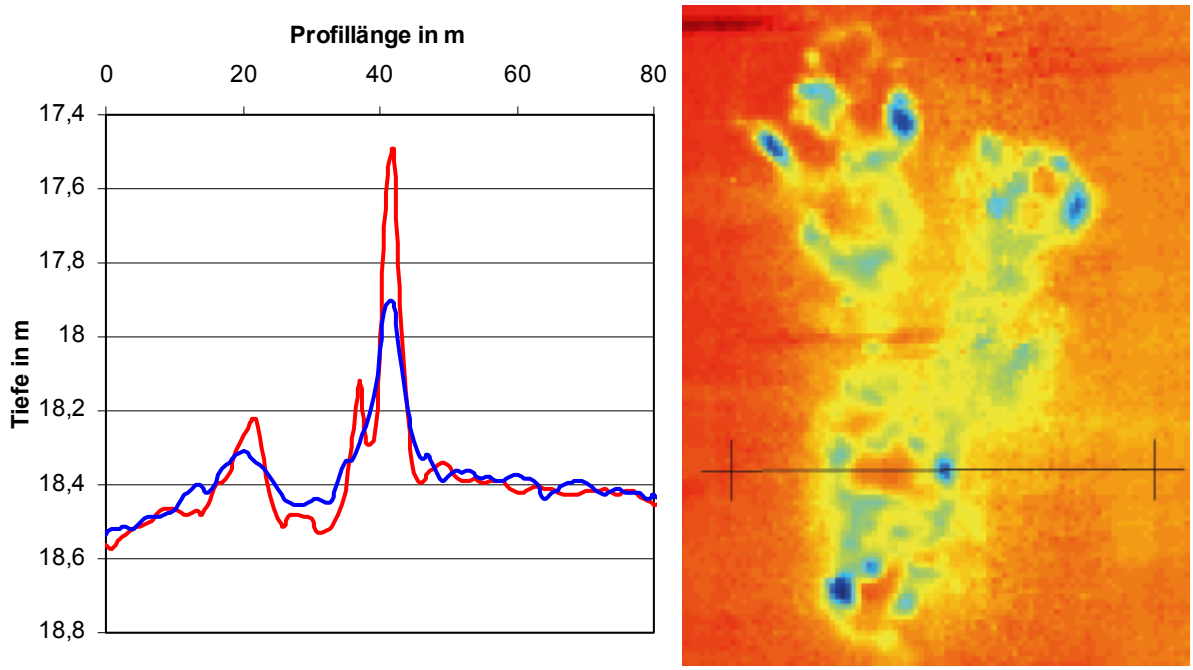


Abbildung 76: Profil über die Mischbodenklappstelle, rot – August 2001, blau – Oktober 2003.

Auch in den Tiefenhistogrammen der Mischbodenklappstelle ist diese Tendenz zur Abflachung zu erkennen. Während einer Tiefe von 18,2 m bis 17.2 m ein Materialabtrag stattfand, wurde in den tieferen Gebieten Material angelagert (*siehe Abbildungen 77–79*). Die Maximalhöhe der Strukturen hat sich mit 1,55 m (Minimaltiefe 17,1 m bei Seebodentiefe von ca. 18,65 m)) im August 2001 und 0,95 m (Minimaltiefe 17,7 m) im Oktober 2003 um bis zu 60 cm verringert.

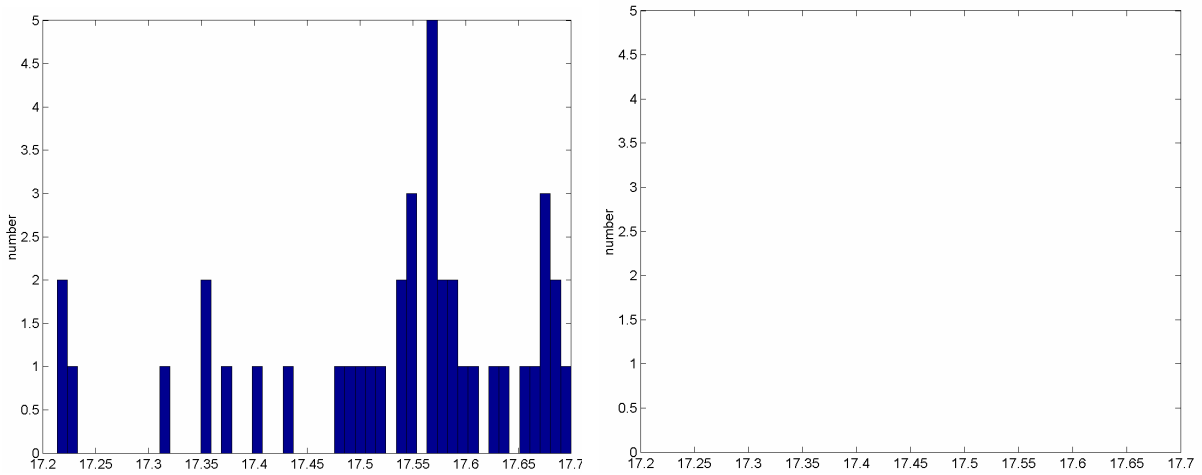


Abbildung 77: Tiefenhistogramm (Häufigkeit der Tiefenwerte von 17,2 bis 17,7 m), August 2001 (links), Oktober 2003 (rechts).

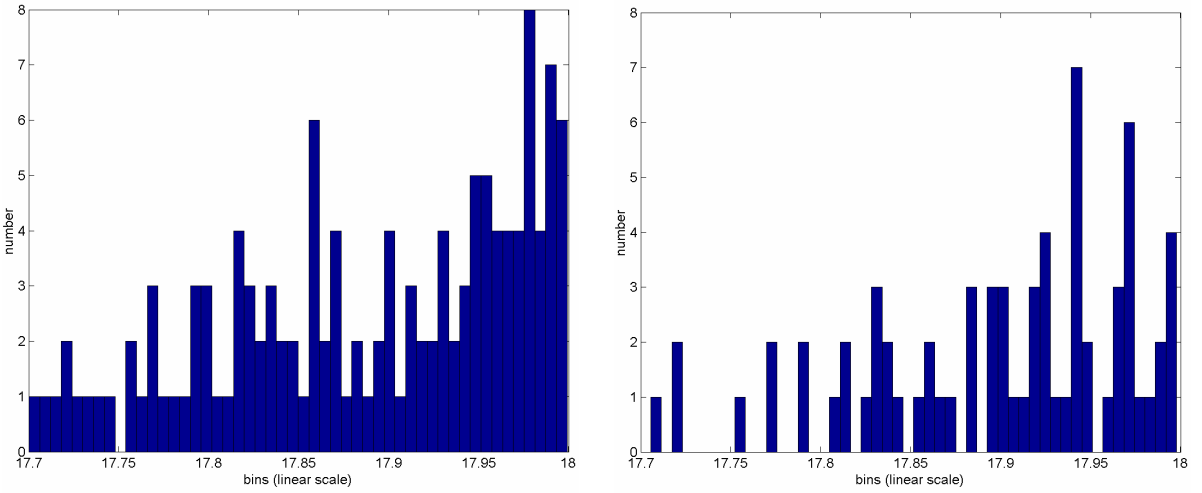


Abbildung 78: Tiefenhistogramm (Häufigkeit der Tiefenwerte von 17,7 bis 18 m), August 2001 (links), Oktober 2003 (rechts).

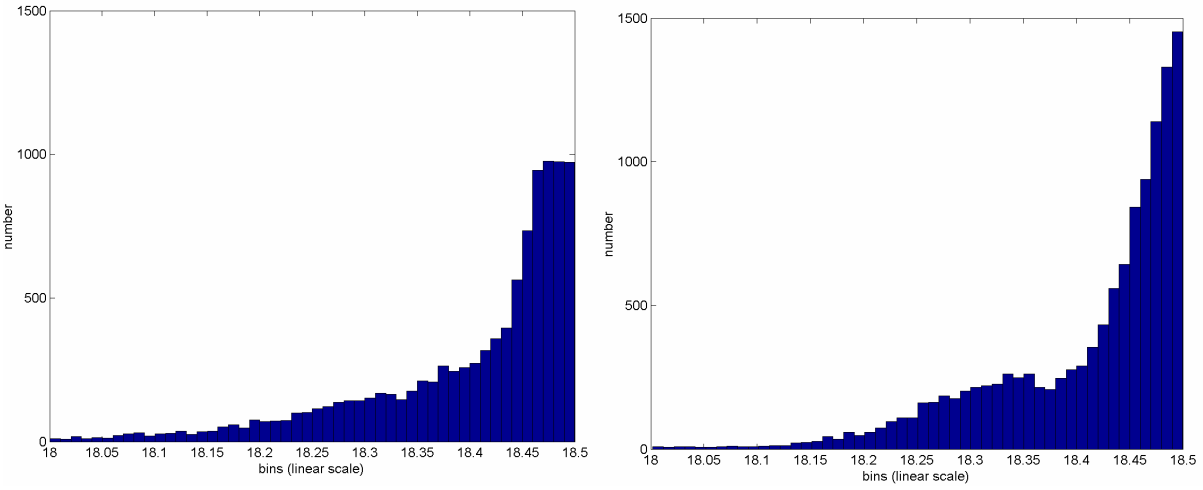


Abbildung 79:Tiefenhistogramm (Häufigkeit der Tiefenwerte von 18 bis 18,5 m), August 2001 (links), Oktober 2003 (rechts).

6.3 Volumenveränderungen

Bei der Betrachtung der Formparameter wurden eindeutig Veränderungen festgestellt. Im nächsten Schritt wird untersucht, in welchem Maße sich diese Veränderungen auch im Gesamtvolumen des Materials wiederfinden.

6.3.1 Differenzbilder

Die Differenzbilder der Messungen von August 2001 und Oktober 2003 wurden wie folgt gebildet:

Differenz = August 2001 – Oktober 2003.

Die blauen Bereiche auf den Differenzbildern bedeuten eine Volumenzunahme und in den roten Bereichen hat sich das Volumen verringert.

Mergel

Auf dem Differenzbild der Mergelstrukturen (*siehe Abbildung 80*) erkennt man ringförmige Bereiche der Volumenabnahme. Diese ringförmigen Bereiche liegen direkt über den Kraterrändern, man sieht also die Abflachung der Krater auf den Differenzbildern. Eine Volumenzunahme hat vor allem im Kraterinneren und auf den nordwestlichen Seiten der Kraterwände stattgefunden.
Unter der Annahme, dass die Dichte des Materials konstant geblieben ist, kann man aus dem Differenzbild auf Materialumlagerungen schließen. Dabei scheint eine Vorzugsrichtung der Materialbewegung nach Nordwesten vorzuliegen.

In den Gebieten außerhalb der Mergelstrukturen liegt die Differenz im Mittel bei Null. Es gibt insgesamt keine Volumenveränderungen außerhalb der Mergelstrukturen.

Die Differenzwerte schwanken im Histogramm (*siehe Abbildung 81)* um einen Bereich von ±0,2 m, wobei 95 % der Veränderungen in einem Bereich von ±0,05 m stattgefunden haben. Dabei sind Volumenzu- und -abnahmen etwa gleich verteilt.

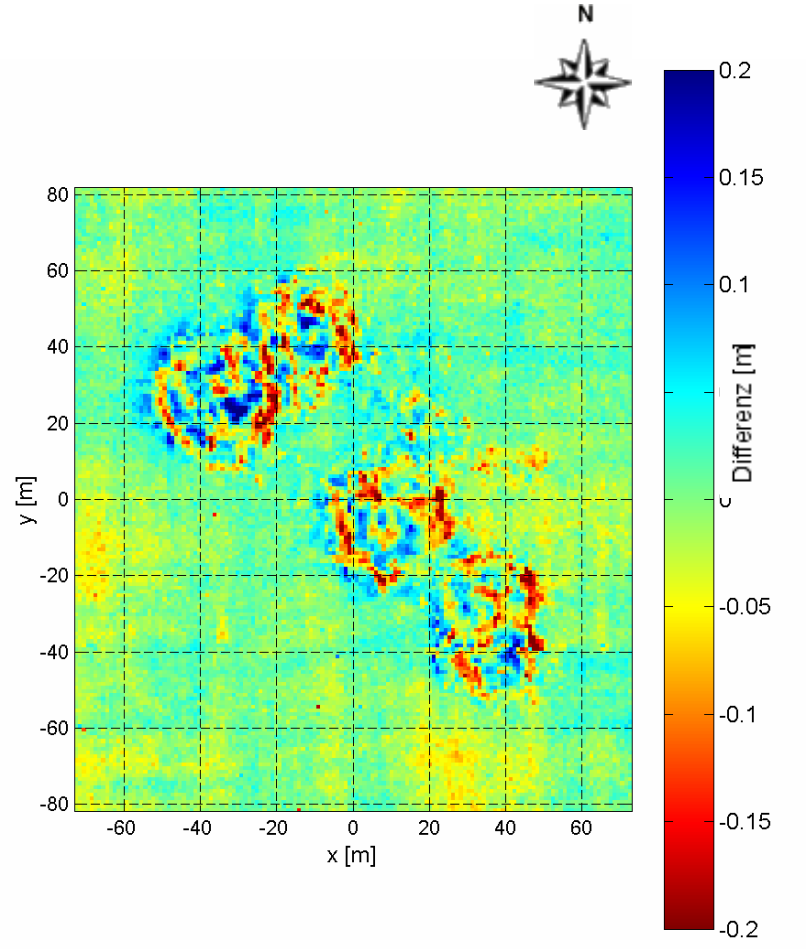


Abbildung 80: Differenzbild für die Mergelklappstelle; August 2001 – Oktober 2003.

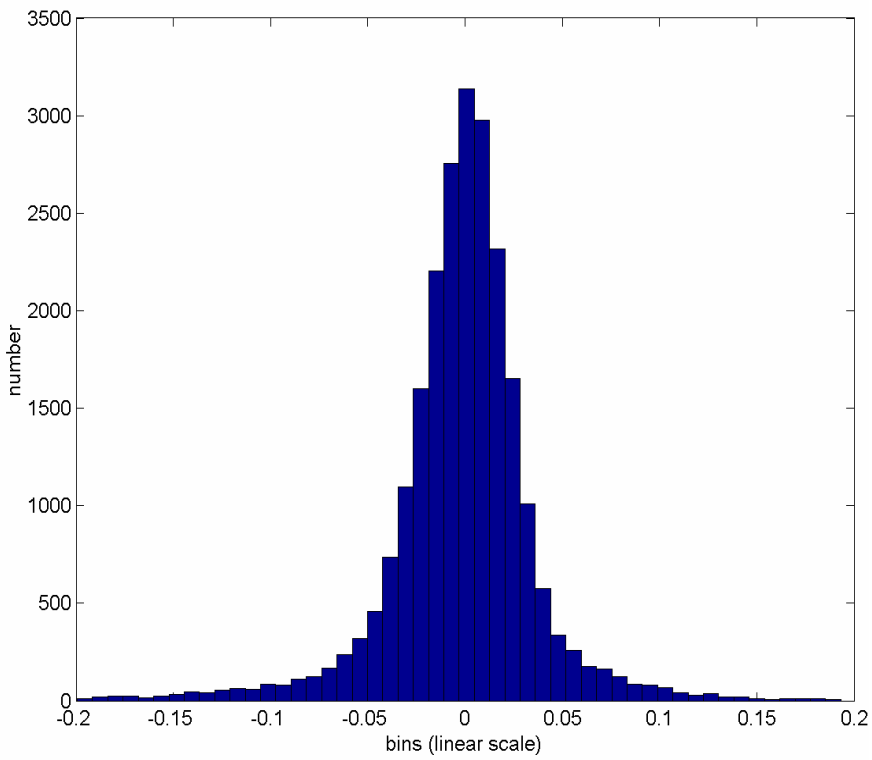


Abbildung 81: Differenzhistogramm Mergel; August 2001 – Oktober 2003.

Mischboden

Auch auf dem Differenzbild im Bereich der Mischbodenklappstelle (*siehe Abbildung 82*) ist eine Tendenz zum Abflachen der Spitzen und Auffüllen der Senken zu finden. Im nördlichen und im südlichen Abschnitt scheint sich das abgetragene Material vor allem im Inneren der Klappstrukturen zu sammeln. Auf den ersten Blick ist auf der Mischbodenklappstelle allerdings keine Vorzugsrichtung der Materialverlagerungen zu sehen.

In den Gebieten außerhalb der Verklappungsstrukturen liegt die Differenz auch über der Mischbodenklappstelle im Mittel bei Null. Es gibt insgesamt keine Volumenveränderungen außerhalb der Mischbodenstrukturen.

Die Differenzwerte schwanken im Histogramm (*siehe Abbildung 83*) um einen Bereich von ±0,1 m, wobei 95 % der Veränderungen in einem Bereich von ±0,07 m stattgefunden haben. Dabei entfallen 66 % aller Differenzwerte auf Volumenzunahmen und 44 % aller Werte auf Volumenabnahmen.

Mit der Annahme, dass die Dichte des Materials unverändert geblieben ist, wurde das abgetragene Material von einer kleinen Fläche (rote Bereiche im Differenzbild) auf einer größeren Fläche (blaue Bereiche im Differenzbild) wieder angelagert. Das heisst, die Spitzen der Verklappungsstrukturen wurden abgetragen und über der Mischbodenklappstelle verteilt.

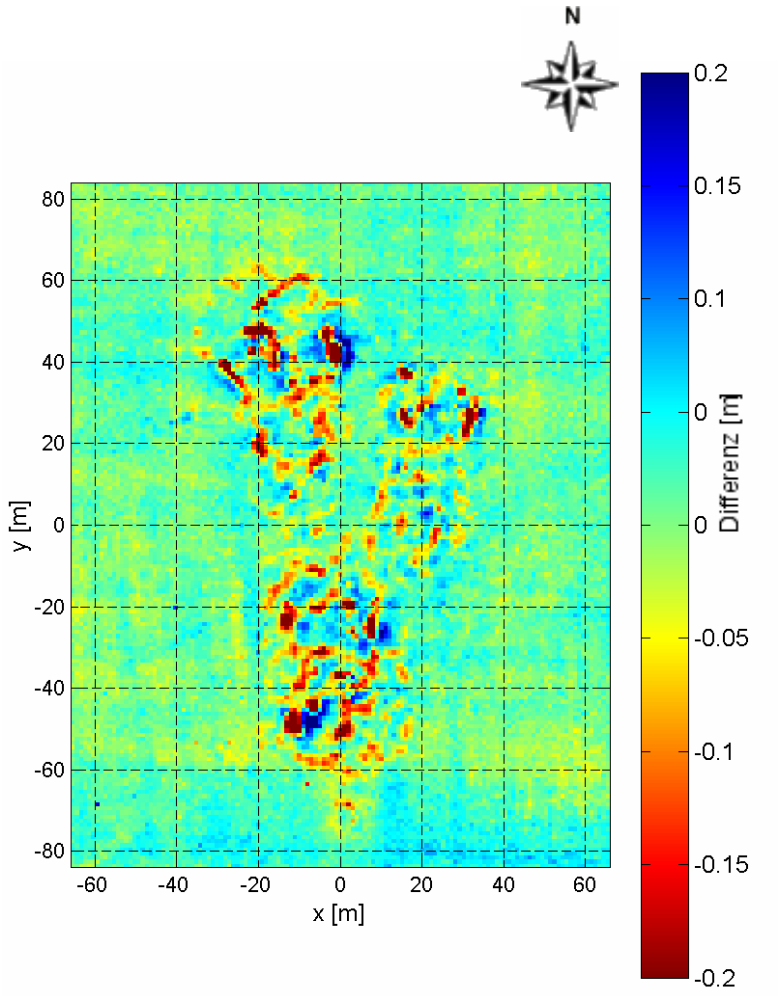


Abbildung 82: Differenzbild Mischboden; August 2001 – Oktober 2003.

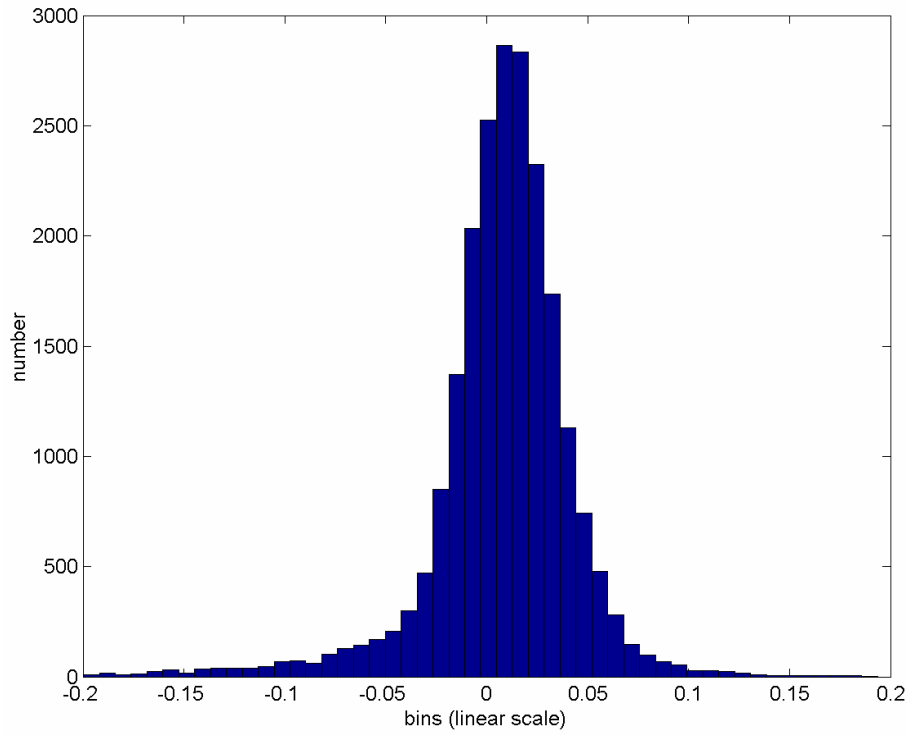


Abbildung 83: Differenzhistogramm Mischboden; August 2001 – Oktober 2003.

6.3.2 Absolute Volumenbilanzen

Zur Bestimmung der absoluten Volumenbilanzen wurde das Gesamtvolumen der Kartenausschnitte über einer Ebene in 18,7 m Tiefe berechnet.

Tabelle 7: Gesamtvolumen über der 18,7-m-Ebene.

Zeit	Gesamtvolumen über der 18,7-m-Ebene in m³	
	Mergel Fläche: 23.635 m²	Mischboden Fläche: 21.877 m²
August 2001	2347	4977
Oktober 2003	2303	5112
Differenz	– 44	+ 135

Die Mergelklappstelle hat im Zeitraum von August 2001 bis Oktober 2003 44 m³ Volumenverluste aufzuweisen. Im Gegensatz dazu hat die Mischbodenklappstelle einen Volumenzuwachs von 135 m³ zu verzeichnen.

6.3.3 Tiefenabhängige Volumenveränderungen

Mergel

Um genau zu sehen, in welchen Tiefen Anlagerungen bzw. Abträge des Volumens stattgefunden haben, wurden die Volumenänderungen tiefenabhängig für jeden einzelnen Krater untersucht (*siehe Abbildung 84*).

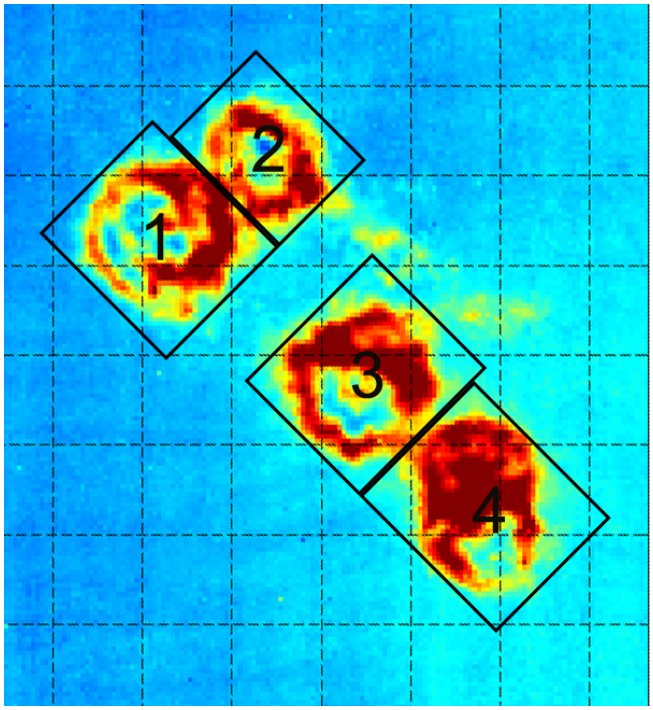


Abbildung 84: Kartenausschnitte der Mergelkrater.

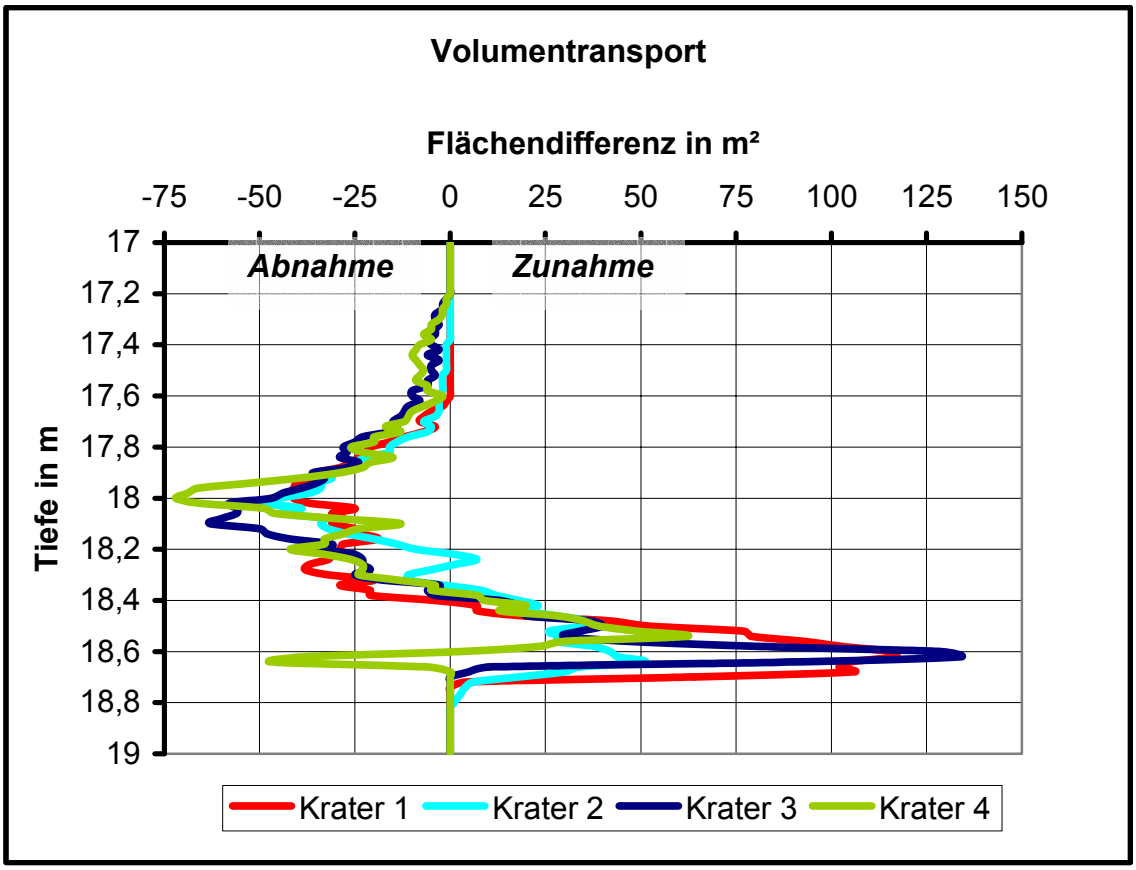


Abbildung 85: Schnittflächendarstellung der Mergelkrater.

Bei allen vier Kratern beschränkt sich der Volumenverlust vor allem auf den Bereich <18,4 m Tiefe und die Volumenzunahme auf die tieferen Gebiete (*s. Abbildung 85*). Dabei gleichen sich Volumenverlust und -gewinn bei den beiden nördlichen Kratern 1 + 2 aus, während die südlichen Krater 3 + 4 an Volumen verlieren (*siehe Tabelle 8*). Insgesamt beläuft sich der Volumenverlust direkt über den Mergelkratern auf ca. 26 m³.

Tabelle 8: Volumenbewegungen der Mergelkrater.

Mergel August 2001 – Oktober 2003	Krater 1	Krater 2	Krater 3	Krater 4
Abnahme	– 19,14 m³	– 14,44 m³	– 22,58 m³	– 23,2 m³
Zunahme	+ 21,86 m³	+ 10,9 m³	+ 14,18 m³	+ 6,34 m³
Gesamt	+ 2,72 m³	– 3,54 m³	– 8,4 m³	– 16,86 m³

Mischboden

Zur tiefenabhängigen Volumenuntersuchung der Mischbodenklappstelle wurden vier Einzelbereiche direkt über den Verklappungsstrukturen betrachtet und der umliegende Bereich weitestgehend ausgeschlossen (*siehe Abbildung 86*).

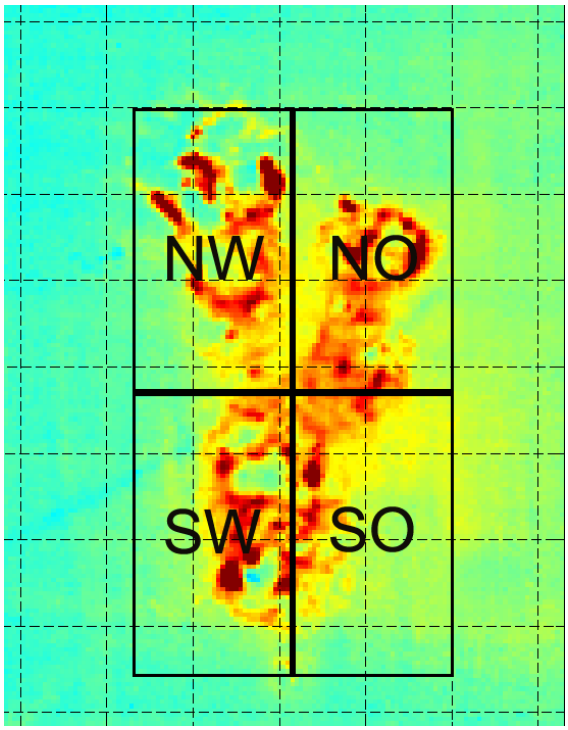


Abbildung 86: Kartenausschnitte der Mischbodenklappstelle.

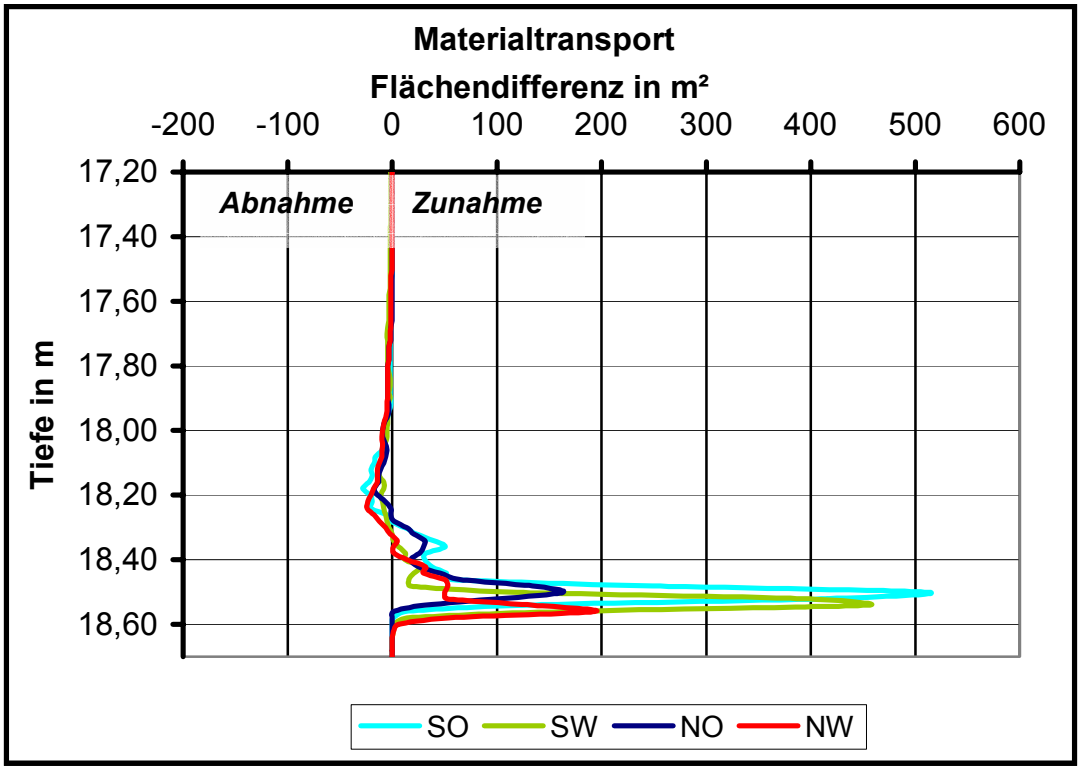


Abbildung 87: Schnittflächendarstellung der Mischbodengebiete.

Alle vier Teilbereiche der Mischbodenklappstelle weisen einen Materialverlust im oberen Bereich auf, jedoch einen deutlich größeren Volumengewinn im unteren Bereich der Strukturen (*siehe Abbildung 87*). Alle Teilbereich zusammen verzeichnen einen Volumenzuwachs von insgesamt 67 m³.

Tabelle 9: Volumenbewegungen der Mischbodenklappstelle.

Mischboden August 2001 – Oktober 2003	NW	NO	SW	SO
Abnahme	– 5,88 m³	– 3,52 m³	– 4,46 m³	– 5,32 m³
Zunahme	+ 13,54 m³	+ 14,2 m³	+ 25,22 m³	+ 33,06 m³
Gesamt	+ 7,66 m³	+ 10,68 m³	+ 20,74 m³	+ 27,74 m³

6.4 Richtung der Verlagerungen

Das Differenzbild der Mergelklappstelle zeigte eine leichte Richtungstendenz nach NW. Eine präzisere Aussage über eine Vorzugsrichtung der Verlagerungen kann mittels Untersuchung des optischen Flusses getroffen werden.
Dazu wurden Richtung und Stärke (Strecke/Magnitude) des optischen Flusses dargestellt (*siehe Abbildungen 88 und 89*). Die Winkelangaben der Richtung beziehen sich auf Nordrichtung. Positive Werte sind im Uhrzeigersinn gegen Nord gedreht, negative Werte dagegen. Die Magnitunde stellt den Weg der Verschiebung in Metern dar.

Die Mergelklappstelle weist einen optischen Fluss in Richtung Westen und Nordwesten auf (-100° bis -50°). Die Stärke der Verschiebung beträgt in 92 % aller Fälle weniger als 2 m.
Bei der Mischbodenklappstelle weist der optische Fluss vor allem auf der westlichen Seite in östliche Richtung (50° bis 150°), auf der östlichen Seite dagegen scheinen die Bewegungen vor allem in nordwestliche Richtung (-100° bis -50°) zu verlaufen. Der Mischboden hat damit keine klare Bewegungsrichtung aufzuweisen. Stattdessen scheint sich Material im Inneren der Klappstelle anzusammeln.
Auch wenn die Verschiebung beim Mischboden Werte von bis zu 15 m erreicht, liegen 60 % aller Messwerte bei einer Verschiebungsweite von nur 5 m.

Um Verschiebungen im Bereich von 2–5 m sichtbar machen zu können, musste der Trace-Wert sehr niedrig angesetzt werden. Für die Berechnungen des optischen Flusses der Klappstellen wurde er mit 0,0025 festgelegt.

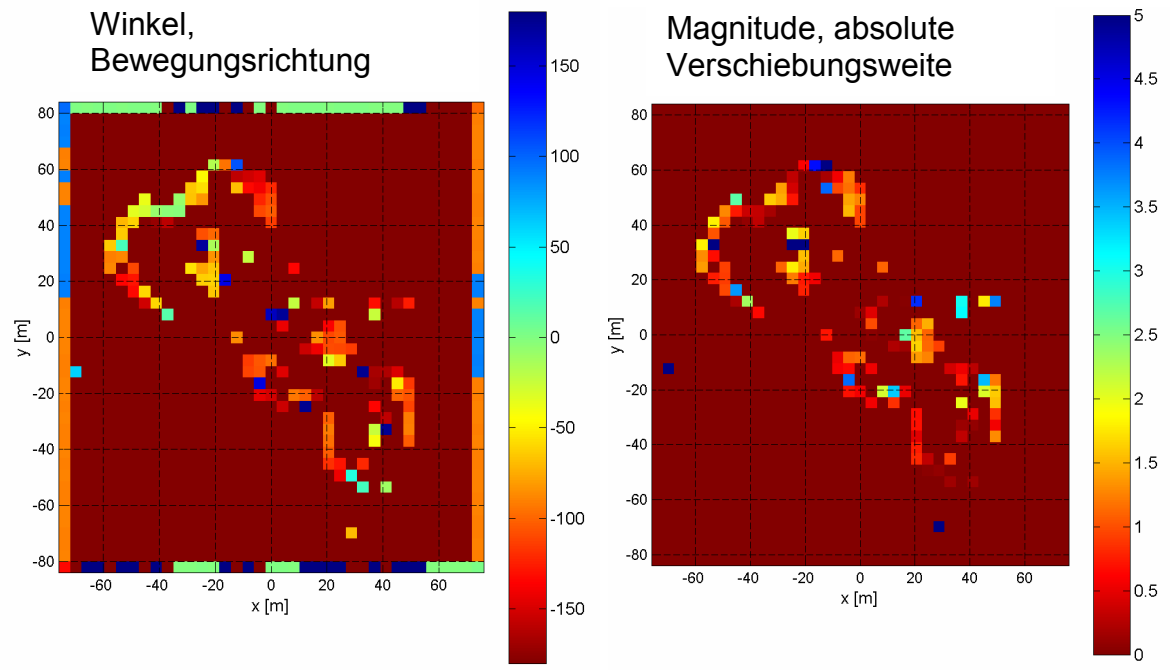


Abbildung 88: Mergel, Richtung (links) und Magnitude (rechts) des optischen Flusses.

.

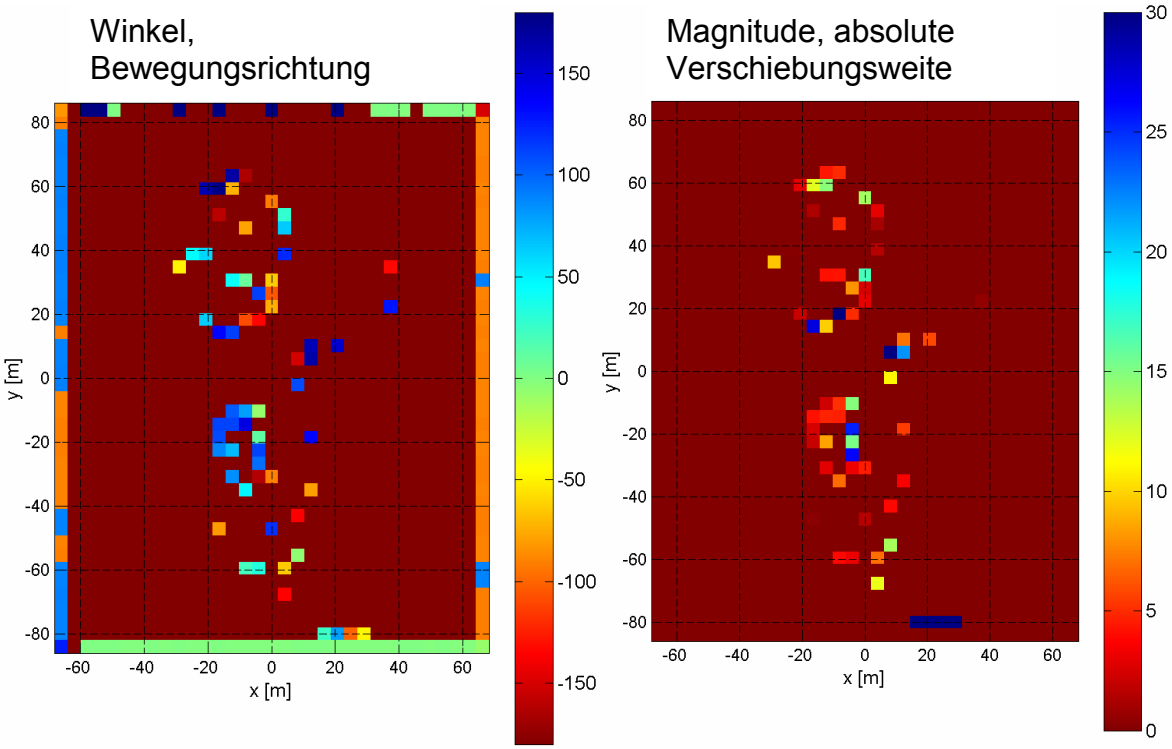


Abbildung 89: Mischboden, Richtung (links) und Magnitude (rechts) des optischen Flusses.

6.5 Rauhigkeit

Zur Darstellung der Oberflächenrauhigkeit wurde die Varianz der Laplace-Pyramide berechnet. Die Pyramidenlevel mit den zugehörigen Skalierungsgrößen sind in Tabelle 5, Kapitel 5.4 aufgeführt.

Beide Klappstellen zeigen bei Strukturen in der Größenordnung 2–16 m eine Abnahme der Varianz von August 2001 bis Oktober 2003, dabei unterliegen die kleineren Frequenzen größeren Veränderungen. Bei Strukturen größer als 16 m sind keine Veränderungen mehr erkennbar (*siehe Abbildungen 90 und 91*).
Die kleinen Strukturen (Level 0 bis 2), wie zum Beispiel die Rippel auf den Kraterwänden der Mergelstrukturen oder kleinere Rauhigkeiten der Mischbodenklappstelle, wurden sehr stark geglättet, während sich bei großen Strukturen (ab Level 3), wie zum Beispiel einem gesamten ringförmigen Krater der Mergelverklappung oder der Grundstruktur der Mischbodenverklappung, kaum eine Veränderung ergab.

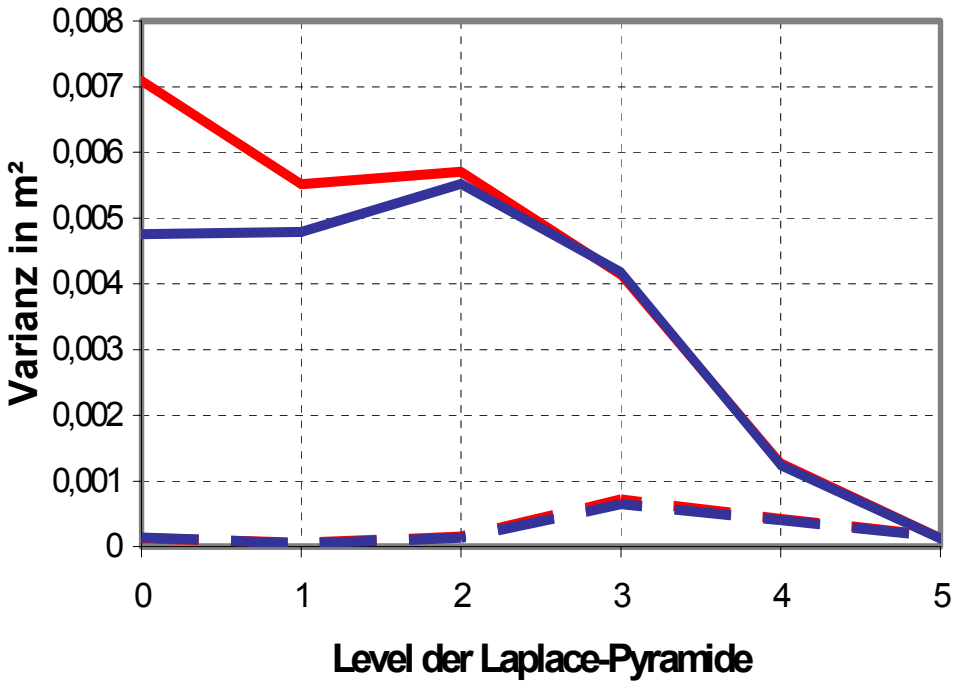


Abbildung 90 : Rauhigkeit der Mergelstrukturen ausgedrückt in Varianzen der Laplace-Pyramide; August 2001 (rot), Oktober 2003 (blau), Varianz über ebenem Gebiet (gestrichelt).

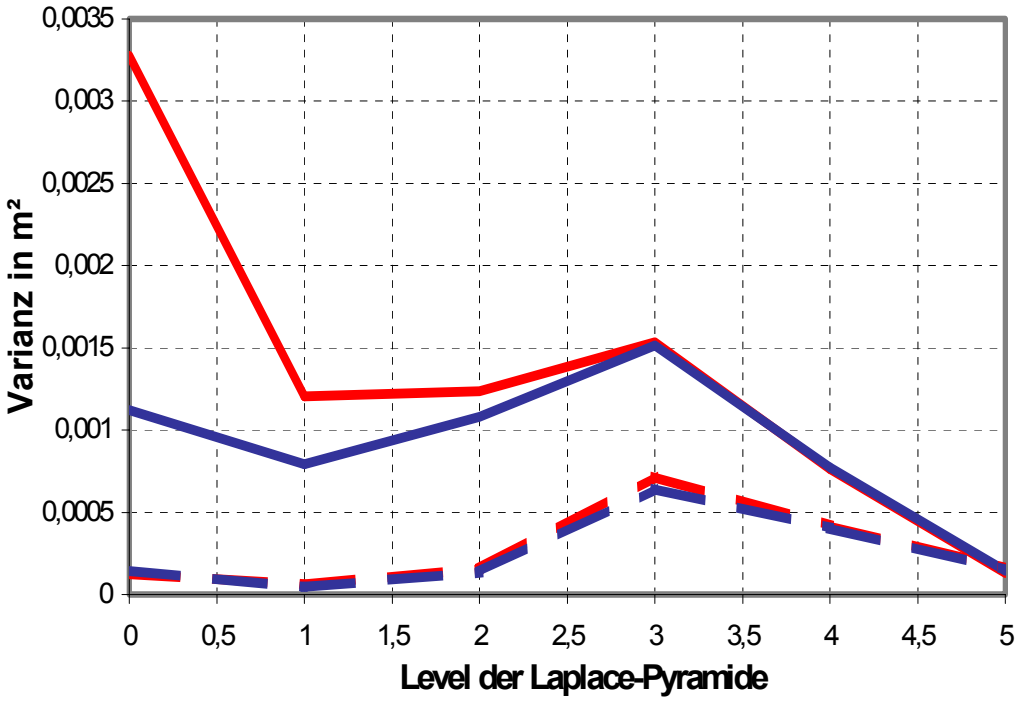


Abbildung 91 : Rauhigkeit der Mischbodenstrukturen ausgedrückt in Varianzen der Laplace-Pyramide; August 2001 (rot), Oktober 2003 (blau), Varianz über ebenem Gebiet (gestrichelt).

7 Fehlerbetrachtung

7.1 Allgemein

Die Vermessung der Bathymetrie mit dem Fächerecholotsystem hatte bei den Messkampagnen im August 2001 und im Oktober 2003 in der Tiefe eine Genauigkeit von 5–7 cm, abhängig davon, ob Phasen- oder Amplitudenmessung zur Laufzeitbestimmung genutzt wurde [5]. Obwohl die Höhe der Verklappungsstrukturen im Vergleich zur Breite sehr gering ausfällt, war eine sehr genaue Messung der Unterschiede möglich, da sie zum Teil eine Höhe von bis zu 1,5 m erreichen. Der geringe Schüttwinkel der Strukturen erhöhte sogar noch die Reproduzierbarkeit der Messungen, da eine Verschlechterung der Messgenauigkeit durch die Entstehung von Schallschatten nahezu ausgeschlossen werden konnte.
Die Geländemodellierung mit dem Seabed Algorithmus im Programm CFloor© ergibt eine Standardabweichung der einzelnen Gitterpunkte von ±3 cm [15]. Da sich die Tiefenänderungen im Zeitraum von August 2001 bis Oktober 2003 auf ca. ±0,15 m belaufen, sind sie mit dieser Genauigkeit reproduzierbar.

Diese Genauigkeit wurde aber durch einen systematischen Effekt herabgesetzt. Da sich die Genauigkeit der Tiefenmessung an den Fächerrändern von der Genauigkeit der Tiefenmessung im Fächerzentrum unterscheidet, entsteht ein Muster mit unterschiedlichen Genauigkeiten über dem Geländemodell.
Die überfahrenen Schiffslinien hatten bei einer Überdeckung von 400 % einen Abstand von 32 m. Bei einem Öffnungswinkel von 120° und einer Wassertiefe von 18,5 m wird unter jeder Fahrtlinie ein Gebiet von ca. 64 m Breite überstrichen. Daraus folgt, dass das Gebiet direkt unter jeder Schiffslinie jeweils einmal von einer Fächermitte und zweimal von Fächerrändern überstrichen wird.
Durch die unterschiedliche Genauigkeit von Phasen- und Amplitudenmessung liegt der Fehler durch die Überlagerung der Fächerränder von verschiedenen Schiffslinien in Abständen von 32 m bei ca. 5–7 cm, während die Fehler zwischen den Fahrtlinien niedriger sind. Dadurch liegt über den Seebodenkarten ein leicht sichtbares 32-m-Gitter mit erhöhten Rauschwerten. Vor allen Dingen auf den Differenzbildern der ebenen Flächen kommt das rechtwinklige Netz der Schiffslinien zum Vorschein (*siehe Abbildung 92*).

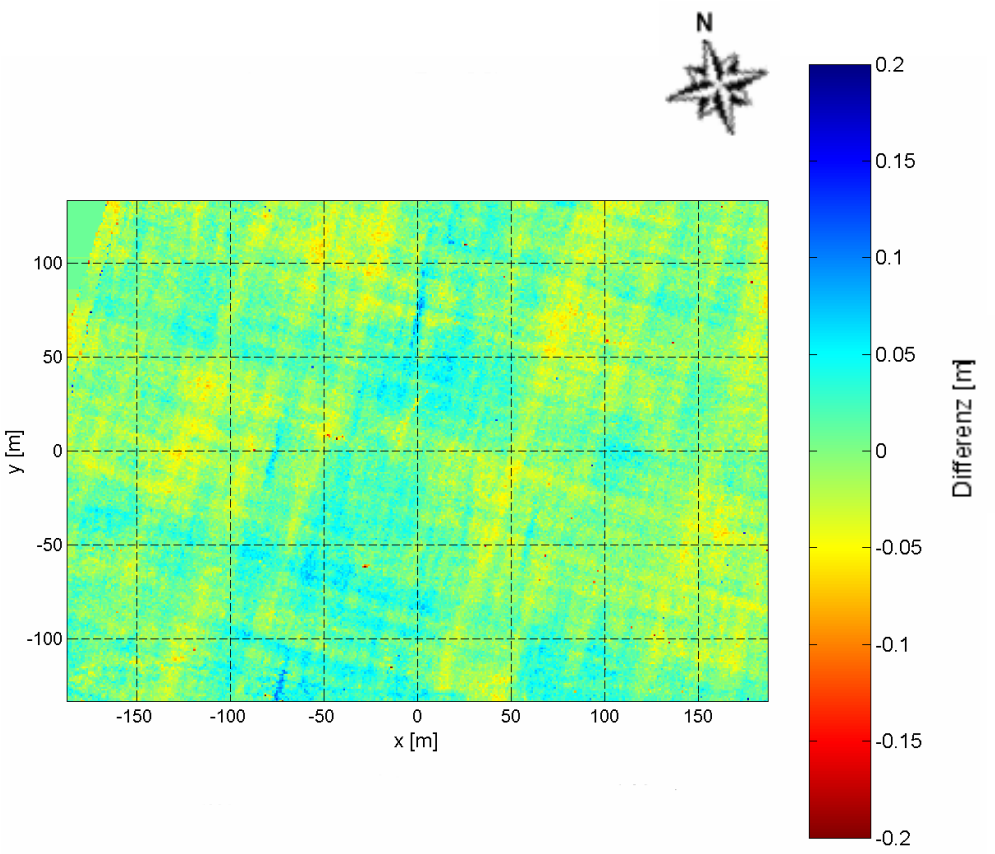


Abbildung 92: Schiffsliniennetz im Differenzbild der Referenzfläche.

Der die Klappstellen umgebende Meeresboden besteht nach Aussagen eines Tauchers aus ebenen festen Mischboden mit einer leichten Wellenstruktur, die eine Amplitude von ca. 0,02 m und eine Wellenlänge von ca. 0,2 m aufweist. Da die Schleppbrettspur im SW des Gebietes im betrachteten Zeitraum absolut stabil geblieben ist, kann man davon ausgehen, dass der umliegende Meeresboden auch keinen Veränderungen unterworfen ist. Da seine Tiefe nur um ca. 2 cm also weniger als die Messgenauigkeit variiert, kann er zu Betrachtungen der Fehler herangezogen werden.

7.2 Volumen

7.2.1 Differenzbilder

Die Genauigkeit der Seebodenkarten liegt bei 5–7 cm. Damit ergibt sich für die Differenzbilder eine Genauigkeit von 7–10 cm.

7.2.2 Absolute Volumenbilanzen

Der Fehlerwert der absoluten Volumenbilanzen ergibt sich aus der Standardabweichung der einzelnen Tiefenwerte. Bei der Berechnung des Volumens wird dieser Wert allerdings aufsummiert.

$$f(V) = \frac{f(T)}{\sqrt{n}} n = f(T)\sqrt{n}$$

f(V): Fehler des Volumens
f(T): Fehler der Tiefen (5–7 cm)
n: Anzahl der Werte (Mergelklappgebiet 163 x 145, Mischboden 167 x 131).

Damit ergibt sich eine Volumengenauigkeit von ±7,7 m³ bis 10,8 m³ für die Mergelklappstelle und 7,4 m³ bis 10,4 m³ für die Mischbodenklappstelle.

Die Offsetkorrektur wurde mit einer Genauigkeit von ±1 mm durchgeführt. Bei der Betrachtung der Tiefen mit einer Genauigkeit von 3 cm, fällt eine gleichmäßige Erhöhung oder Verringerung aller Tiefen um 1 mm nicht ins Gewicht. Bei der Berechnung des Volumens über einer größeren Fläche wird dieser Fehler aber aufsummiert. Beim Mergelklappgebiet (163 m x 145 m) kann der Fehler bis zu 24 m³ betragen, während er beim Verklappungsgebiet des Mischbodens (167 m x 131 m) bis zu 22 m³ erreichen kann.

Daraus resultiert für die Berechnung des Volumens eine Fehlerbreite von ca. ±35 m³ auf dem Kartenausschnitt der Mergelklappstelle und ±33 m³ auf dem Kartenausschnitt der Mischbodenklappstelle. Mit dieser Fehlerbreite liegt die ermittelte Volumendifferenz des Mergels von -44 m³ sehr dicht am Fehler. Die Volumenzunahme des Mischbodens von +135 m³ dagegen ist reproduzierbar.

7.2.3 Tiefenabhängige Volumenuntersuchung

Bei den Mergelkratern wurden Gebiete einer Größe von ca. 40 m x 40 m untersucht. Bezieht man die Fehler aus Kapitel 7.2.2 auf diese kleinere Fläche, erhält man eine Genauigkeit von ca. ±5,2 m³.

Tabelle 10: Volumenbilanzen der Mergelkrater.

Krater 1	Krater 2	Krater 3	Krater 4	Fehler
+ 2,72 m³	– 3,54 m³	– 8,4 m³	– 16,86 m³	±5,2 m³

Damit liegt die Volumenzunahme von 2,72 m³ und die Volumenabnahme von 3,54 m³ der Kratern 1 und 2 im Bereich des Fehlers. Die Volumenabnahmen bei den Kratern 3 bis 4 sind dagegen mit ca. 8,5 m³ und 17 m³ tendenziell reproduzierbar.
Insgesamt ergab sich ein Volumenverlust von 26 m³ für die Mergelkrater. Für das Gesamtgebiet belaufen sich Offset- und Rauschfehler zusammen auf etwa ±10 m³.

Bei der Mischbodenklappstelle wurden Flächen von ca. 35 m x 65 m Größe betrachtet. Das entspricht einem Fehler von ca. ±7,3 m³. Die Ergebnisse dieser Berechnung lagen bei:

Tabelle 11: Volumenbilanzen der Mischbodenklappstelle.

NW	NO	SW	SO	Fehler
+ 7,66 m³	+ 10,68 m³	+ 20,74 m³	+ 27,74 m³	±7,3 m³

Die Volumenbilanzen der nördlichen Bereiche des Mergelklappgebietes liegen sehr dicht am Wert des Fehlers. Sie sind jedoch tendenziell reproduzierbar. Die Volumenbilanzen für das südliche Gebiet der Mischbodenklappstelle sind dagegen vollständig reproduzierbar.
Das Gesamtgebiet erhält einen Volumenzuwachs von 67 m³, welcher im Rahmen einer Unsicherheit von ±16 m³ sehr gut reproduzierbar ist.

7.3 Richtung

Die Sensitivität der Richtungsuntersuchung wurde mit dem Trace-Wert T eingestellt.

$$T = \overline{g^2_{t'}} + \overline{g^2_{x'}} + \overline{g^2_{y'}}$$

Bei der Berechnung des optischen Flusses über den Klappstellen wurde er mit 0,0025 festgelegt, damit auch kleine Änderungen (ca. 3,5 cm) zwischen den Tiefenwerten erfasst werden konnten. Bei höheren Trace-Werten wurden alle Lösungen ausgeschlossen, da sie als nicht signifikant gewertet wurden. Auf diese Weise können aber auch Veränderungen in die Berechnungen einfließen, welche nur aufgrund des Rauschens der Tiefenwerte des Geländemodells entstanden.
Des weiteren ist zu sagen, dass eine Verschiebung in x- bzw. y-Richtung von 2–5 m auf einem Geländemodell mit einem 1-m-Gitter kaum ins Gewicht fällt, deshalb machen die Berechnungen des optischen Flusses über den Klappstellen ebenfalls nur tendenzielle Aussagen über die Materialverlagerungen im betrachteten Zeitraum.

7.4 Rauhigkeit

Die Varianz macht eine Aussage über den Betrag der mittlere Höhe der Strukturen. Deshalb erhält man eine geringe Erhöhung der Varianz durch Rauschen. Der Anteil der Varianz, der durch die Standardabweichung der Tiefenmessung entsteht, beträgt also im Mittel:

$$F(V) = \frac{F(T_M)^2}{4}$$

$F(V)$: Fehler für die Varianz

$F(T_M)$: Genauigkeit der Fächerecholotmessung, Fehler der Tiefen.

Die Tiefenmessung mit dem Fächerecholot hat nach der Geländemodellierung eine Genauigkeit von ca. 3–7 cm. Das ergibt für die Varianz eine Genauigkeit im Bereich von $2{,}25*10^{-4}$ m² bis $12{,}25*10^{-4}$ m².

Dieser Fehlerbereich ließ sich mit einer Varianzberechnung über ebener Fläche (*siehe Abbildung 93*) bestätigen. Er liegt mit ca. $1*10^{-4}$ m – $7*10^{-4}$ m² Dabei ist ein Anstieg des Fehlers in Level 3 und 4 der Laplace-Pyramide bzw. im Bereich der 16 – 6 4-m-Strukturen zu erkennen.

Da das Schiff im August 2001 Linien im Abstand von 32 m gefahren ist, ergibt sich immer im Abstand von 32 m durch die Überlagerung von zwei Fächerrändern ein schmaler Bereich mit einem höheren Fehler, welcher genau in Level 3 der Laplace-Pyramide auftaucht. Im Oktober 2003 wurde der Abstand der Linien im Bereich der Verklappungsstellen auf 16 m herab gesetzt, dadurch verringerte sich das Fehlerrauschen der Messung von Oktober 2003. Die ebene Fläche, die zu Untersuchung der Fehler verwendet wurde, befand sich aber zum Teil in einem Gebiet mit 32-m-Schiffslinien. Daher ist die Verbesserung der Datenlage durch die Verringerung der Schiffslinienabstände über den Klappstellen in Abbildung 93 nicht so deutlich zu erkennen. Eine Ebene, welche nur den Bereich mit 800 % Überdeckung erfasst hätte, wäre zu klein und zu dicht an den Klappstellen gewesen und daher nicht repräsentativ.

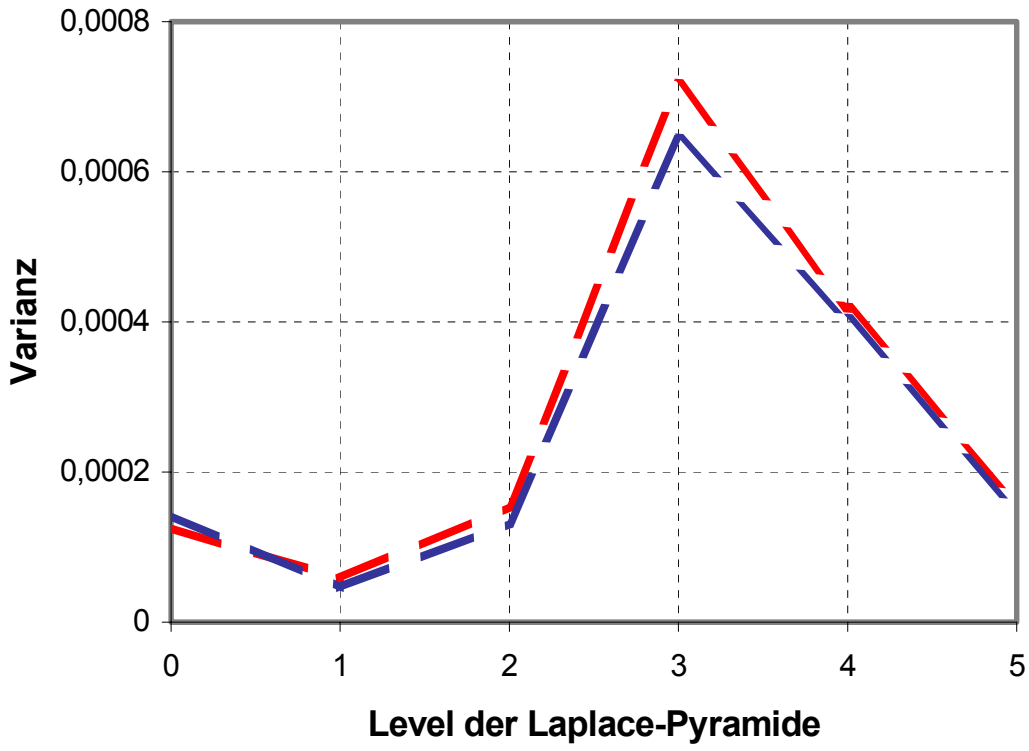


Abbildung 93: Varianz über ebener Fläche.

8 Interpretation

Zur Untersuchung der zeitlichen Veränderungen einer experimentellen Verklappungsstelle vor Warnemünde mittels Fächerecholotdaten wurden Formparameter, Volumina, Richtungsbetrachtungen und Rauhigkeit herangezogen. Es sollte dargestellt werden, welche Veränderungen sich seit der Verklappung ergeben haben.

Aus einer vorangegangenen Diplomarbeit [2] war bekannt, dass die zu erwartenden Veränderungen im Zentimeterbereich und damit nahe am Rande der Nachweisgrenze lagen. Für derart empfindliche Messungen mussten zum Zeitpunkt der Vermessung sehr gute Wetterverhältnisse vorliegen und jede Einzelkomponente des Fächerecholotsystems musste reibungslos funktionieren.
Diese Bedingungen lagen nur bei zwei der insgesamt vier existierenden Messungen vor, bei der Messung von August 2001 (1½ Monate nach der Verklappung des Materials) und bei der Messung von Oktober 2003 (27½ Monate nach der Verklappung des Materials). Aus diesen beiden Messungen ließen sich wesentliche Schlüsse über die Entwicklung der Klappstelle ziehen:

Formparameter

Die Darstellung von Profilen und Tiefenhistogrammen zeigt bei der Mergel- und bei der Mischbodenklappstelle ein Abnahme der Spitzen und ein Auffüllen der Senken. Zusätzlich nimmt die Wandstärke der Mergelkrater in den oberen Bereichen ab. Die maximale Höhe hat sich bei den Mergelkratern um 13 cm und bei den Mischbodenstrukturen um 60 cm verringert. Die beiden Flächen weisen demzufolge Tendenzen zu einer Abflachung und Verbreiterung auf. Dabei verändern sich die Mischbodenablagerungen deutlich schneller als die Mergelstrukturen. Während die Mergelkrater ihre Form weitestgehend beibehalten haben, hat sich der Grundaufbau der Mischbodenstrukturen umfassender verändert.

Untersuchung der Volumina

Aus der Berechnung des Gesamtvolumens ergab sich für die Mergelklappstelle ein Volumenverlust von 44 m³ (±35 m³ Fehler). Davon entfallen laut tiefenabhängiger Volumenuntersuchung 26 m³ (±10 m³ Fehler) auf die Krater selbst. Bei einer Kraterfläche von ca. 4 x 40 x 40 m² entsprechen 26 m³ einer mittleren Höhenabnahme um ca. 4 mm innerhalb der 30 Monate seit der Verklappung. Auch wenn beide Werte nahe an der Nachweisgrenze liegen, zeigt sich bei beiden eine Tendenz zur Abnah-

me des Mergelvolumens. Zur Feststellung, ob sich das Material verdichtet hat oder abtransportiert wurde, sind diese Volumina aber deutlich zu gering.

Die Mischbodenklappstelle hat auf einer Fläche von 131 m x 167 m einen starken Volumenzuwachs von 135 m³ (±33 m³ Fehler) zu verzeichnen. Das entspräche einer gleichmäßigen Höhenzunahme von ca. 6 mm auf der gesamten Fläche. Da die nähere Umgebung der Klappstelle keine Veränderungen zu verzeichnen hat, kann das Material nur aus dem verklappten Material selbst stammen.

Bewegungsrichtung

Da die Berechnung des Volumens der Klappstellen zumindest für die Mischbodenklappstelle eine sichere Veränderung ergab, konnte eine Untersuchung der Bewegungsrichtung des Materials durchgeführt werden. Dabei ergab sich auf der Mergelklappstelle eine sehr schwache Verschiebung in nordwestlicher Richtung. Diese Tendenz lässt sich über der Mischbodenklappstelle nicht reproduzieren. Diese weist Bewegungen in östlicher und westlicher Richtung auf.

Laut Richtungsuntersuchungen mittels optischem Fluss ist die vorherrschende Bewegungsrichtung der Mergelklappstelle Nordwesten, damit entfällt das Mergelklappgebiet als Quelle für den Volumenzuwachs der Mischbodenstrukturen. Der Volumenzuwachs kann also nur aus dem Material der Mischbodenklappstelle selbst entstanden sein. Die tiefenabhängige Volumenuntersuchung über der unmittelbaren Verklappungsstelle ergab für die Tiefenbereiche <18,3 m eine Volumenabnahme von insgesamt 20 m³. Die Gesamtvolumenerhöhung von 135 m³ kann nur zu einem geringen Teil durch die Auflockerung des abgetragenen Materials von den Spitzen stammen. Da trotz des geringen Materialabtrags an den Spitzen eine starke Tendenz zu Abflachung und Verbreiterung der Strukturen zu erkennen ist, muss das gesamte Material der Mischbodenverklappung ungerichtet in Bewegung sein. Möglicherweise hat sich der Mischboden bei diesen Umlagerungen als Ganzes aufgelockert, was zu der beobachteten Volumenerhöhung geführt haben könnte.

Rauhigkeit

Die Untersuchung der Rauhigkeit ergab bei beiden Klappstellen im Bereich von 2–16 m Strukturgröße eine Glättung und bei Strukturen, die größer sind als 16 m Stabilität. Kleinere Strukturen, wie zum Beispiel die Rippel auf den Kraterwänden des Mergelmaterials oder kleinere Maxima auf der Mischbodenklappstelle, wurden dabei

schneller geglättet als großskalige Formen, wie zum Beispiel die Mergelkrater als Ganzes. Außerdem wurden die Mischbodenstrukturen deutlich schneller geglättet als die Mergelkrater.

Zur Abschätzung des Zeitraums, der für eine vollständige Einebnung der Klappstellen notwendig ist, kann mit Hilfe der berechneten Varianzen ein Modell zur Vorhersage der Höhenabnahme erstellt werden.

Modell zur Vorhersage der Einebnungszeit

Eine Verringerung der Varianz im betrachteten Zeitraum ist gleichbedeutend einer durchschnittlichen Höhenabnahme der Verklappungsstrukturen.

Tabelle 12: Varianzen zur Erstellung eines Vorhersagemodells.

Strukturgröße	2–4 m	4–8 m	8–16 m
Level	0	1	2
Varianz Rauschen (y_0)	0,000126 m²	0,000058 m²	0,000154 m²
Mergel			
Varianz August 2001	0,007084 m²	0,005516 m²	0,005708 m²
Varianz Oktober 2003	0,004755 m²	0,004786 m²	0,005523 m²
Mischboden			
Varianz August 2001	0,003277 m²	0,001204 m²	0,001234 m²
Varianz Oktober 2003	0,001119 m²	0,000791 m²	0,001078 m²

Linearer Ansatz

Eine mögliche Methode, ist die Annahme einer linearen Abnahme der Strukturhöhe (*siehe Abbildungen 94 und 95)*.

$$y = mx + y_1 - y_0$$

Dabei ist y_1 der maximale Varianzwert zum Zeitpunkt der Verklappung und y_0 entspricht dem Varianzwert, welcher durch das Rauschen der Tiefenwerte entsteht.

Bei diesem Ansatz liegt der Zeitpunkt der Einebnung ungefähr im Bereich der Nullstellen.

Tabelle 13: Zeit (in Jahren [a]) für die vollständige Abnahme der Strukturen nach dem linearen Ansatz.

Level	0	1	2
Strukturgröße	2–4 m	4–8 m	8–16 m
Mergel	6 a	11 a	62 a
Mischboden	3,2 a	6 a	16 a

Unter Ausschluss der biologischen Faktoren und Extremwetterereignissen wird nach dem linearen Ansatz die Mischbodenklappstelle in etwa 16 Jahren keine sichtbaren Strukturen (<16 m) mehr aufweisen, während das erst in ca. 62 Jahren bei der Mergelklappstelle der Fall sein wird.

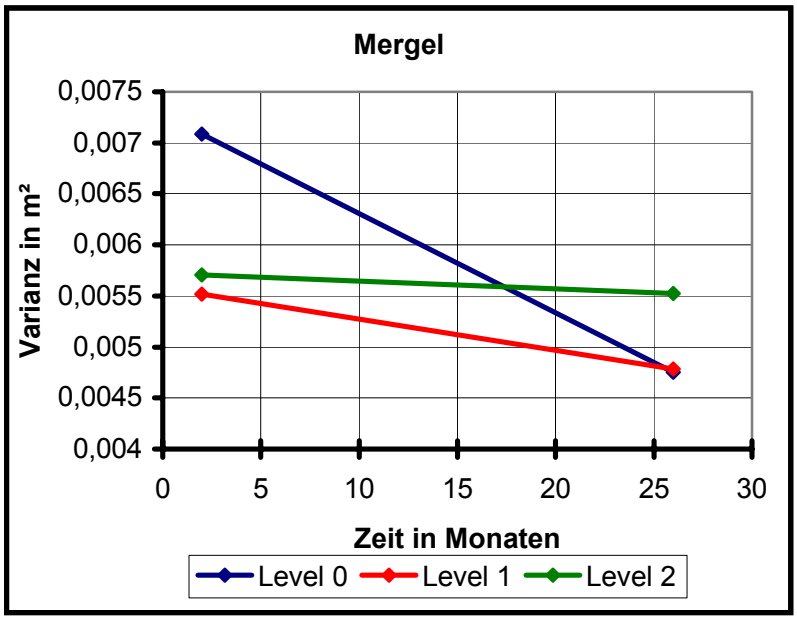


Abbildung 94: Lineare Abnahme der Mergelvarianz.

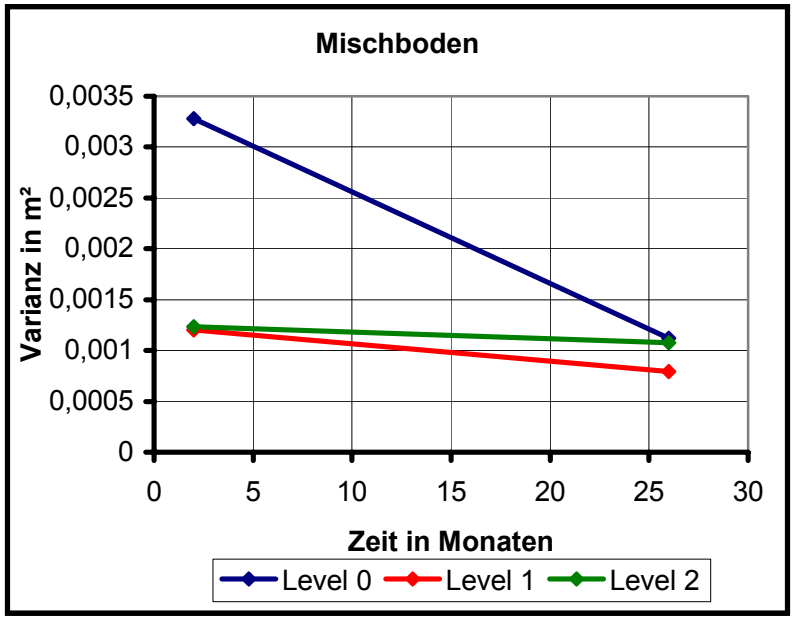


Abbildung 95: Lineare Abnahme der Mischbodenvarianz.

Exponentieller Ansatz

Eine weitere Möglichkeit für die Vorhersage der Höhenabnahme mit der Zeit in jeder Größenordnung ist die Annahme einer exponentielle Abnahme.

$$y = y_0 + A\exp(-\frac{x}{t})$$

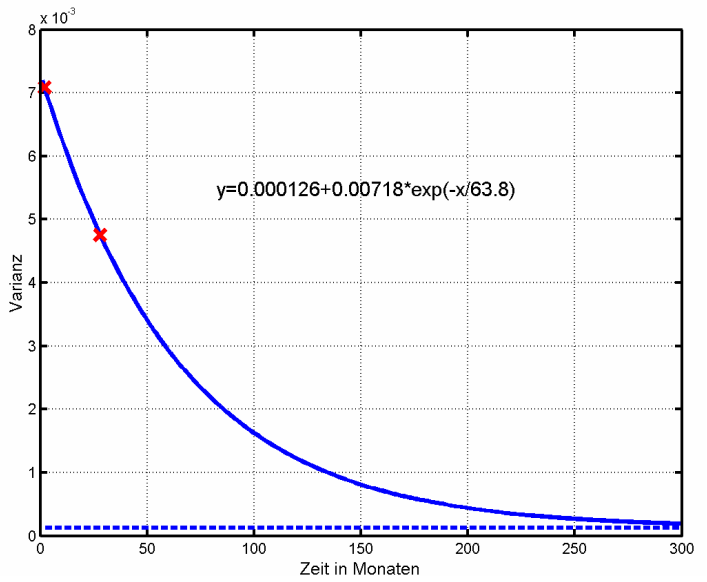
Dabei wurde für y_0 der Varianzwert zugrunde gelegt, der durch Rauschen entsteht und welcher sich nicht mit der Zeit verändern wird, wenn die Messbedingungen wie bisher beibehalten werden.

Es wurden nur die Varianzwerte von Level 0 bis 2 für die Vorhersage betrachtet, da die Varianz der größeren Strukturen über den gemessenen Zeitraum nahezu stabil war.
Bei den ermittelten Funktionen für die exponentielle Abnahme der Varianz (*siehe Abbildungen 96 und 97*) wird ebenfalls deutlich, dass kleinere Strukturen schneller geglättet sein werden als größere. Außerdem verringern sich die Strukturen der Mischbodenverklappung 3–4mal schneller als die der Mergelverklappung (*siehe Tabelle 6*).

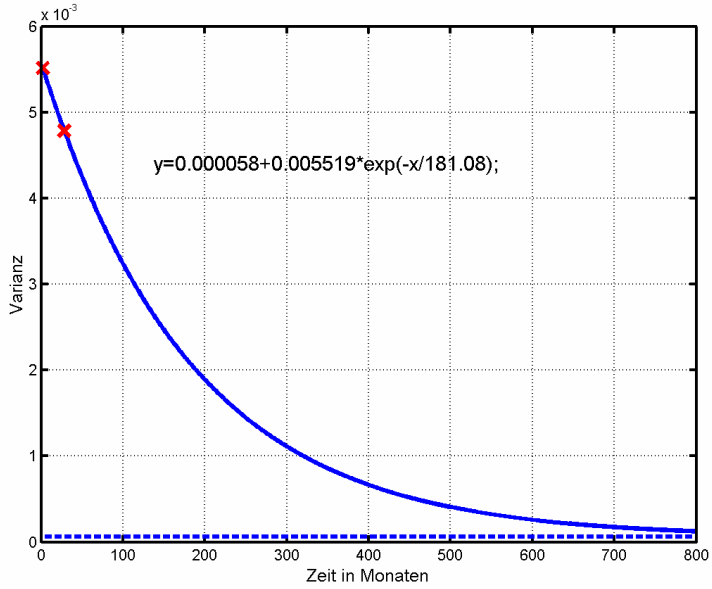
Tabelle 14: Zeit (in Jahren [a]) für die vollständige Abnahme der Strukturen.

Level	0	1	2
Strukturgröße	2–4 m	4–8 m	8–16 m
Mergel	25 a	67 a	250 a
Mischboden	8 a	20 a	58 a

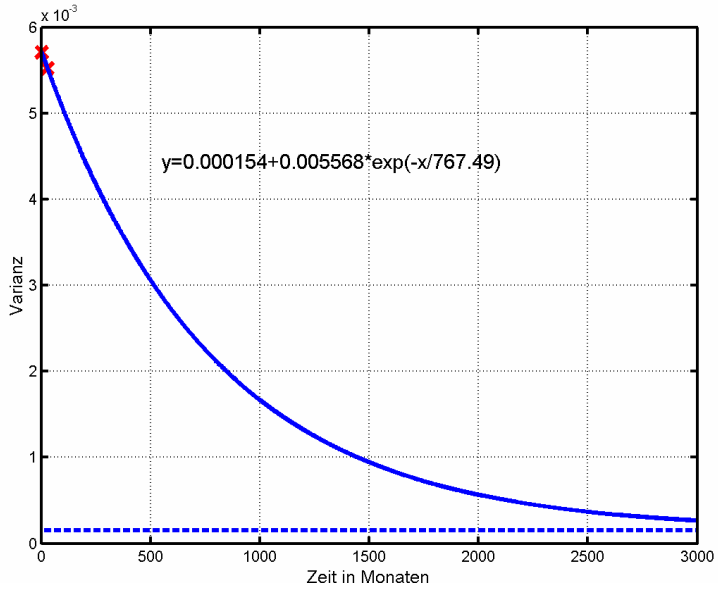
Unter Ausschluss der biologischen Faktoren und Extremwetterereignissen wird nach dem exponentiellen Ansatz die Mischbodenklappstelle in etwa 60 Jahren keine sichtbaren Strukturen (<16 m) mehr aufweisen, während das erst in ca. 250 Jahren bei der Mergelklappstelle der Fall sein wird.



Level 0: 2–4 m

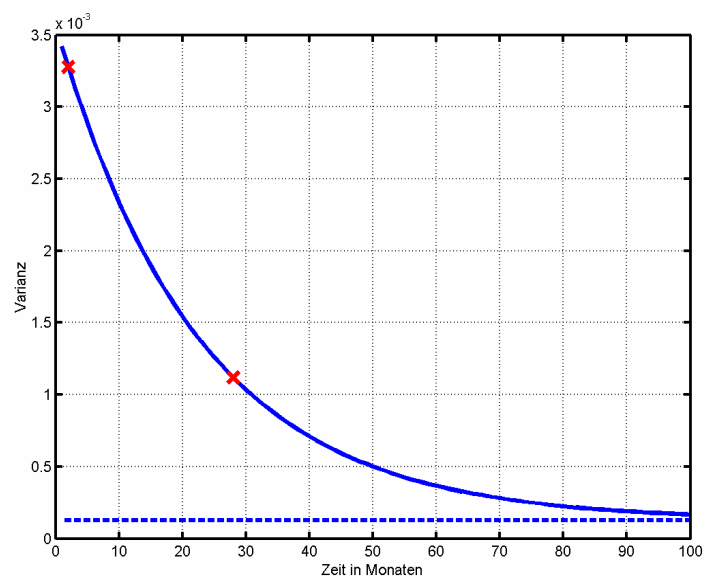


Level 1: 4–8 m

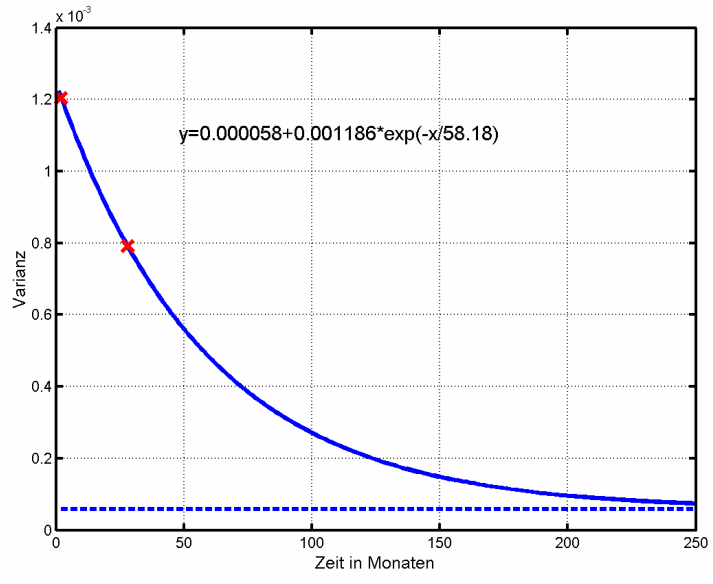


Level 2: 8–16 m

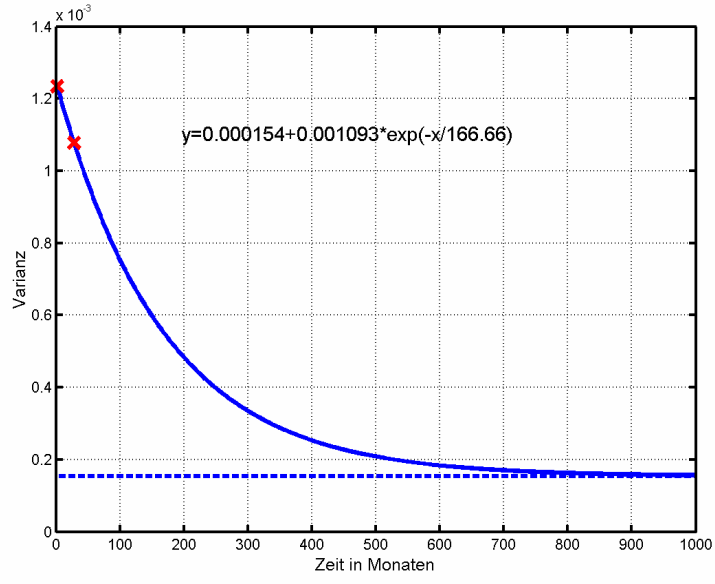
Abbildung 96: Exponentielle Abnahme der Mergelvarianz.



Level 0: 2–4 m



Level 1: 4–8 m



Level 2: 8–16 m

Abbildung 97: Exponentielle Abnahme der Mischbodenvarianz.

9 Fazit und Ausblick

Aufgabe der Diplomarbeit war die Untersuchung morphologischer Veränderungen auf einer experimentellen Verklappungsstelle vor Warnemünde. Dazu wurden Aussagen über Form- und Volumenveränderungen gemacht, der Materialtransport und seine Richtung untersucht und die Rauhigkeiten der Oberfläche dargestellt.

Das Fächerecholot EM 3000 hat sich für eine Vermessung der experimentellen Verklappungsstelle als geeignet erwiesen. Die morphologischen Veränderungen der Klappstellen konnten aufgeführt werden und selbst die Darstellung der geringfügigen Veränderungen auf der Mergelklappstelle war möglich.

Bei der Auswertung wurde gezeigt, dass beide Klappstellen eine Tendenz zum Abflachen und zur Verbreiterung ihrer Strukturen aufweisen. Auch, wenn sich das Volumen der Mischbodenklappstelle erhöht hat, haben die Strukturen an Höhe verloren und auch die Rauhigkeit hat sich in der Größenordnung von 2–32 m deutlich verringert. Insgesamt hat sich die Mischbodenklappstelle in allen untersuchten Punkten deutlich stärker verändert als die Mergelklappstelle.

Durch eine Berechnung der Varianz der Seebodenkarten über den Verklappungsstellen und die Beobachtung der Abklingkurve der Varianz mit der Zeit können Aussagen über die zeitliche Entwicklung der Klappstelle getroffen werden. Dabei werden die Mischbodenstrukturen mehr als dreimal so schnell eingeebnet wie die Mergelstrukturen.
Um jedoch eine präzisere Vorhersage über die zeitliche Entwicklung der Verklappungsstrukturen treffen zu können, sind mehr Vermessungen notwendig. Auch die Messung der morphologischen Veränderungen über wenige Tage und bei Extremwetterereignissen wäre zur genaueren Untersuchung hilfreich.
Es war nicht möglich eine Aussage über den Verbleib des fehlenden Materials auf der Mergelklappstelle zu machen. Die Frage, ob das Material verdriftet wurde oder sich verfestigt hat, konnte aufgrund der Geringfügigkeit des Volumenverlustes noch nicht geklärt werden. Dazu sind noch einige Messungen in größeren zeitlichen Abständen notwendig.
Auch die Herkunft des Volumenzuwachses auf der Mischbodenklappstelle konnte nicht eindeutig zugeordnet werden. Nur eine Materialanlagerung von außen kann durch die Untersuchung der umliegenden Bereiche ausgeschlossen werden.

Ohne den Einfluss von Extremwetterereignissen oder natürlichen Faktoren, wie zum Beispiel Bohrmuscheln, die die Verklappungsstrukturen zersetzen, wird die Mergelklappstelle vermutlich auch bei den nächsten Messungen nahezu stabil bleiben. Dagegen kann bei der Mischbodenklappstelle bei den nächsten Messungen die weitere Entwicklung des Volumens beobachtet und möglicherweise eine genauere Aussage über die Herkunft der Volumenzunahme getroffen werden.
Wünschenswert wäre auch eine gleichzeitige Messung von Strömung und Seegang in diesem Gebiet, um bessere hydrographische Randbedingungen für die Simulation und Vorhersage der weiteren Entwicklung zu erhalten.

10 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

10.1 Abbildungen

Abbildung 1: *Lage der Klappstelle in der Ostsee.*
Abbildung 2: *Mit dem Fächerecholot erstellte Seebodenkarte der Klapp-stelle von August 2001.*
Abbildung 3: *WGS84-Koordinatensystem (aus [3] bearbeitet).*
Abbildung 4: *Gauß-Krüger-Koordinatensystem, Hoch- und Rechtswerte.*
Abbildung 5: *Forschungsschiff LUDWIG PRANDTL.*
Abbildung 6: *GPS-Empfänger auf der LUDWIG PRANDTL.*
Abbildung 7: *Referenzstation in Nienhagen.*
Abbildung 8: *Kreiselkompass Anschütz 4 des EM 3000 Fächerecholotsystems.*
Abbildung 9: *Bewegungssensoren an Bord der LUDWIG PRANDTL.*
Abbildung 10: *Koordinatensystem der Schiffsachsen [8].*
Abbildung 11: *Sende- und Empfangswinkel [10] bei der Fächerecholotmessung.*
Abbildung 12: *Seismogramm der empfangenen Signale [10].*
Abbildung 13: *Wasserschallprofile im Untersuchungsgebiet vom 14. bis 16. Oktober 2003.*
Abbildung 14: *Dichtegefälle zwischen Ostsee und Kattegat (aus [13]).*
Abbildung 15: *Wasserschallsonde.*
Abbildung 16: *Schiffskreiselkompass.*
Abbildung 17: *Prinzip der Stampfkalibrierung.*
Abbildung 17: *Prinzip der Rollkalibrierung.*
Abbildung 19: *Seabed Algorithm: Unterteilung des Gitternetzes in je 4 Quadranten pro Gitterknoten (aus [14]).*
Abbildung 20: *Seabed Algorithm: Unterteilung der Quadranten in je 2 Sektoren (aus [14]).*
Abbildung 21: *Spiralsuche beim Seabed Algorithm (aus [14]).*
Abbildung 22: *Skizze des Schallschattens.*
Abbildung 23: *Profil über Mergelstrukturen ohne Überhöhung, August 2001.*
Abbildung 24: *Überdeckung der Schiffslinien.*
Abbildung 25: *Schiffslinien bei der Messung im Oktober 2003.*
Abbildung 26: *Juni 2001, Messung mit zu trägen Einstellungen des Bewegungssensors, NS (links), WO (rechts).*
Abbildung 27: *Messung vom August 2001, Daten der WO- und NS-Vermessung in einem Geländemodell.*
Abbildung 28: *Messung von Oktober 2002, NS-Linien.*
Abbildung 29: *Messung von Oktober 2002, WO-Linien.*
Abbildung 30: *Mergelklappstelle, Oktober 2002 (WO-Linien) (links), August 2001 zum Vergleich (WO- und NS-Linien)(rechts).*
Abbildung 31: *Mischbodenklappstelle, Oktober 2002 (WO-Messung)(links), August 2001 zum Vergleich (WO+NS)(rechts).*
Abbildung 32: *Mischbodenklappstelle, Oktober 2002.*
Abbildung 33: *Differenzbilder der Mischbodenklappstelle, August 2001 – Oktober 2002 (links), Oktober 2002 – Oktober 2003 (rechts).*
Abbildung 34: *Mergelklappstelle, Oktober 2002, NS-Linien.*
Abbildung 35: *Messung vom Oktober 2003, WO- und NS-Linien.*

Abbildung 36: Vergleich der Schleppbrettspur August 2001 (links) mit Oktober 2003 (rechts).
Abbildung 37: Referenzfläche zur Offsetkorrektur (Oktober 2003).
Abbildung 38: Differenzbild der Referenzfläche nach der Korrektur (August 2001 – Oktober 2003).
Abbildung 39: Bodenbathymetrie der Messung im Juni 2001. Deutlich erkennbar sind die wellenartigen Strukturen aus der unzureichenden Kompensation durch den Bewegungssensor.
Abbildung 40: Wellenzahlraum des Bildes (Abbildung 38) mit Intensitäts-maxima, links – Juni 2001 nur NS-Linien, Mitte – August 2001 WO- und NS-Linien, rechts – Oktober 2003 WO- und NS-Linien.
Abbildung 41: rechts – Filtermaske zum Ausschneiden der Störstrukturen, links Wellenzahlraum der NS-Linien der Messung von Juni 2001.
Abbildung 42: Bild der Störstrukturen von Juni 2001.
Abbildung 43: Originalbild (links) und wellenkorrigiertes Bild (rechts).
Abbildung 44: Störstrukturen über der Mergelklappstelle.
Abbildung 45: Störstrukturen über der Mischbodenklappstelle.
Abbildung 46: Wellenzahlspektrum des gesamten Messgebietes, links – Juni 2001 unkorrigiert, Mitte – Juni 2001 nach der Korrektur, rechts – August 2001.
Abbildung 47: Wellenzahlspektrum der Mergelklappstelle, links – Juni 2001, unkorrigiert, Mitte – Juni 2001 nach der Korrektur, rechts – August 2001.
Abbildung 48: Wellenzahlspektrum der Mischbodenklappstelle, links – Juni 2001, unkorrigiert, Mitte – Juni 2001 nach der Korrektur, rechts – August 2001.
Abbildung 49: Mergelklappstelle Juni 2001, korrigiert.
Abbildung 50: Mischbodenklappstelle Juni 2001, korrigiert.
Abbildung 51: Sternförmige Profilauswahl zur Bestimmung der Breite der Kraterwände über Krater Nr. 3.
Abbildung 52: Profilschnitt (blau) und angenähertes Polynom 8. Grades (rot), Mergelkrater Nr. 3, August 2001.
Abbildung 53: Schnittebenen für tiefenabhängige Volumendarstellung.
Abbildung 54: Schnittflächen über die Tiefe, Mischbodenklappstelle, August 2001 (rot), Oktober 2003 (blau).
Abbildung 55: Flächendifferenzen.
Abbildung 56: Hafeneinfahrt von Warnemünde [19]. Die Grauwerte von bewegten Objekten auf Bildern bleiben in Bewegungsrichtung erhalten.
Abbildung 57: Veränderliche Grauwertbedingungen durch unterschiedliche Rauschverhältnisse [19].
Abbildung 58: Veränderliche Grauwertbedingungen durch unterschiedliche Lichtverhältnisse/ Intensitäten [19].
Abbildung 59: Veränderliche Grauwertbedingungen durch bewegungs-unabhängige Formveränderungen [19].
Abbildung 60: Gauß-Pyramidenstufen über dem Mergelklappgebiet.
Abbildung 61: Laplace-Pyramidenstufen über dem Mergelklappgebiet.
Abbildung 62: Bathymetrie der Mergelstrukturen, August 2001.
Abbildung 63: Bathymetrie der Mergelstrukturen, Oktober 2003.

Abbildung 64: Bathymetrie der Mergelstrukturen 3D, August 2001.
Abbildung 65: Bathymetrie der Mergelstrukturen 3D, Oktober 2003.
Abbildung 66: Bathymetrie der Mischbodenstrukturen, August 2001.
Abbildung 67: Bathymetrie der Mischbodenstrukturen, Oktober 2003.
Abbildung 68: Bathymetrie der Mischbodenstrukturen 3D, August 2001.
Abbildung 69: Bathymetrie der Mischbodenstrukturen 3D, Oktober 2003.
Abbildung 70: Profil über einem Mergelkrater, rot – August 2001, blau – Oktober 2003.
Abbildung 71: Tiefenhistogramm, Mergel, August 2001.
Abbildung 72: Tiefenhistogramm, Mergel, Oktober 2003.
Abbildung 73: Nummerierung der Kraterstrukturen.
Abbildung 74: Durchschnittliche Kraterbreite, Krater 2, rot – August 2001, blau – Oktober 2003.
Abbildung 75: Durchschnittliche Kraterbreite, Krater 3, rot – August 2001, blau – Oktober 2003.
Abbildung 76: Profil über die Mischbodenklappstelle, rot – August 2001, blau – Oktober 2003.
Abbildung 77: Tiefenhistogramm (Häufigkeit der Tiefenwerte von 17,2 bis 17,7m), August 2001 (links), Oktober 2003 (rechts).
Abbildung 78: Tiefenhistogramm (Häufigkeit der Tiefenwerte von 17,7 bis 18m), August 2001 (links), Oktober 2003 (rechts).
Abbildung 79: Tiefenhistogramm (Häufigkeit der Tiefenwerte von 18 bis 18,5m), August 2001 (links), Oktober 2003 (rechts).
Abbildung 80: Differenzbild für die Mergelklappstelle; August 2001 – Oktober 2003.
Abbildung 81: Differenzhistogramm Mergel; August 2001 – Oktober 2003.
Abbildung 82: Differenzbild Mischboden; August 2001 – Oktober 2003.
Abbildung 83: Differenzhistogramm Mischboden; August 2001 – Oktober 2003.
Abbildung 84: Kartenausschnitte der Mergelkrater.
Abbildung 85: Schnittflächendarstellung der Mergelkrater.
Abbildung 86: Kartenausschnitte der Mischbodenklappstelle.
Abbildung 87: Schnittflächendarstellung der Mischbodengebiete.
Abbildung 88: Mergel, Richtung (links) und Magnitude (rechts) des optischen Flusses.
Abbildung 89: Mischboden, Richtung (links) und Magnitude (rechts) des optischen Flusses.
Abbildung 90 : Rauhigkeit der Mergelstrukturen ausgedrückt in Varianzen der Laplace-Pyramide; August 2001 (rot), Oktober 2003 (blau), Varianz über ebenem Gebiet (gestrichelt).
Abbildung 91 : Rauhigkeit der Mischbodenstrukturen ausgedrückt in Varianzen der Laplace-Pyramide; August 2001 (rot), Oktober 2003 (blau), Varianz über ebenem Gebiet (gestrichelt).
Abbildung 92: Schiffsliniennetz im Differenzbild der Referenzfläche.
Abbildung 93: Varianz über ebener Fläche.
Abbildung 94: Lineare Abnahme der Mergelvarianz.
Abbildung 95: Lineare Abnahme der Mischbodenvarianz.
Abbildung 96: Exponentielle Abnahme der Mergelvarianz.
Abbildung 97: Exponentielle Abnahme der Mischbodenvarianz.

10.2 Tabellen

Tabelle 1: Verwendete Parameter bei der Geländemodellierung mit dem Seabed Algorithm des Programmes CFloor©.
Tabelle 2: Zeittafel der Messkampagnen.
Tabelle 3: Werte für die Offsetkorrektur.
Tabelle 4: Mögliche Lösungen der Eigenwerte und ihre Bedeutung.
Tabelle 5: Level der Laplace-Pyramide und ihre Skalierungsgröße.
Tabelle 6: Parameter für die berechete Kraterbreite.
Tabelle 7: Gesamtvolumen über der 18,7 m-Ebene
Tabelle 8: Volumenbewegungen der Mergelkrater.
Tabelle 9: Volumenbewegungen der Mischbodenklappstelle.
Tabelle 10: Volumenbilanzen der Mergelkrater.
Tabelle 11: Volumenbilanzen der Mischbodenklappstelle.
Tabelle 12: Varianzen zur Erstellung eines Vorhersagemodells.
Tabelle 13: Zeit für die vollständige Abnahme der Strukturen nach dem linearen Ansatz.
Tabelle 14: Zeit für die vollständige Abnahme der Strukturen nach dem exponentiellen Ansatz.

11 Quellenverzeichnis

[1] Harff, J., Institut für Ostseeforschung Warnemünde: Forschungsprojekt: DYNAS Dynamik natürlicher und anthropogener Sedimentation, Abschlußbericht DYNAS I, 2003

[2] Gruß, G.: „Untersuchungen der Veränderungen der Bathymetrie einer experimentellen Verklappungsstelle mittels Fächerecholotmessungen“, Diplomarbeit, 2003

[3] Strobel, J.: „GPS – Global Positioning System“, Franzis – Verlag, 1995

[4] Wagner, J.: „Physische Geographie“, Harms Erdkunde (Bd.8), List (München) 1958

[5] Seibt-Winckler, A., Heineke, M., Riethmüller, R.: „Precision of multibeam echosounder systems for the detection of morphological changes in near shore coastal waters“, in prep.

[6] Bauer, M.: „Vermessung und Ortung mit Satelliten – GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme“, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg 2003

[7] Abel, H.: „GPS: Global Positioning System – Funktionsweise und mathematische Grundlagen“, Esslingen 2001

[8] Kongsberg Simrad AS: Kongsberg Simrad Neptune, Bathymetric post processing, Operation manual, 2001

[9] Fa. TSS UK Ltd. “System Manual DMS Series”, 1997

[10] Informationen und Bilder zum Fächerecholotsystem EM 3000 von Steffen Pausch und Wolfgang Sombrowski

[11] Böth, H., Wirth, H.: „Untersuchung zur Eignung von Fächerlotsystemen für den Einsatz auf den Bundeswasserstraßen“, BfG-JAP-Nr. 2057, 2075, BfG-1082, 1997

[12] Medwin, H.: Journal Acoustic Society America 58, S. 1318–1319, 1975

[13] Institut für Meereskunde, Kiel: “Meereskunde an der Ostsee“, Kapitel 6: Siedler, G. und Hatje, G.: “Temperatur, Salzgehalz und Dichte“, 1978

[14] Roxar Software Solutions AS: CFloor Version 6.2.2, Users Guide, Oslo 2003

[15] Joswig, S.: „Digitale Geländemodellierung in CFloor und Surfer“, Hydrographische Nachrichten 62, Ausgabe 12, S. 6–13, 2001

[16] Jähne, B.: “Practical Handbook on Image Processing for scientific Applications”, CRC Press LLC, New York 1997

[17] Jähne, B.: “Digitale Bildverarbeitung”, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1993

[18] Jähne, B.: „Moderne Konzepte der Bewegungsanalyse“, Handout zu Vortrag

[19] Fotos: Andreas Stockmann

[20] Burt, P. J., Adelson, E. H.: "The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code", IEEE Transaction on Communications, vol. COM-31, pp. 532–540, 1983

Anhang

Anhang A: Formelherleitung der Datenpunktdichte

Die Datendichte D beschreibt die Anzahl der Punkte n pro überfahrener Fläche A:

$$D = \frac{n}{A}$$

Die Fläche A ist abhängig von der überfahrenen Strecke s und der Fächerbreite b_f:

$$A = b_f s$$

Wobei sich die Fächerbreite aus der Wassertiefe T und dem Öffnungswinkel α des Fächers ergibt:

$$b_f = 2T \tan(\frac{1}{2}\alpha)$$

mit $s = vt$ erhalten wir

$$A = 2T \tan(\frac{1}{2}\alpha) vt$$

Die Anzahl der Punkte n ergibt sich aus der Pingrate f_P, der Messzeit t, der Anzahl der aufgenommenen reflektierten Signale n_r und der Überdeckung u:

$$n = f_P * t * n_r * u$$

Damit erhält man für die Datendichte D:

$$D = \frac{f_P n_r u}{2T \tan(\frac{1}{2}\alpha) v}$$

Mit den Werten des SIMRAD EM 3000 Fächerecholots:

Pingrate : $f_P = 15$ Hz

Öffnungswinkel des Fächers: $\alpha = 120°$

Anzahl der Empfänger: $n_r = 127$

erhält man:

$$D = \frac{550u}{vT}$$

Anjang B: Beaufort-Skala

Stärke	Bezeichnung	V_{Wind} in m/s	Auswirkungen
0	Windstille	0,0–0,2	Rauch steigt senkrecht auf; Meer wie ein Spiegel
1	Leiser Zug	0,3–1,5	Rauchablenkung sichtbar; Kleine Wellen – jedoch ohne Kronen
2	Leichte Brise	1,6–3,3	Wind im Gesicht spürbar; Kleine Wellen – Kronen brechen nicht
3	Schwache Brise	3,4–5,4	Dünne Zweige bewegen sich; Kleine Wellen – eventuell Schaum
4	Mäßige Brise	5,5–7,9	Wimpel gestreckt, loses Papier fliegt Kleine Wellen – häufig Schaum
5	Frische Brise	8,0–10,7	Größere Zweige bewegen sich; Gemässigte Wellen – sehr viel Schaum
6	Starker Wind	10,8–13,8	Starke Äste bewegen sich, knatternde Fahnen; Große Wellen – weiße Schaumkronen, eventuell Sprühnebel
7	Steifer Wind	13,9–17,1	Bäume bewegen sich; Hohe Wellen – weißer Schaum wird durch die Luft geweht
8	Stürmischer Wind	17,2–20,7	Autos geraten ins Schleudern; Hohe Wellen – Kronen beginnen zu brechen
9	Sturm	20,8–24,4	leichte Beschädigungen; Hohe Wellen – Kronen beginnen zu rollen, Sprühnebel kann die Sicht behindern
10	Schwerer Sturm	24,5–28,4	entwurzelte Bäume; Sehr hohe Wellen – überhängende Kronen, weiße Meeresoberfläche, Meeresbewegungen gewaltig und ruckartig, Sicht beeinträchtigt
11	Orkanartiger Sturm	28,5–32,6	schwere Zerstörungen; Aussergewöhnlich hohe Wellen – Meer ist vollkommen mit langen, weißen Streifen aus Schaum in der Richtung des Windes bedeckt, Sicht beeinträchtigt
12	Orkan	32,6+	Verwüstungen; Meer türmt sich auf – Luft ist mit Schaum und Sprühnebel angereichert, treibender Sprühnebel, Sicht sehr stark beeinträchtigt

Anhang C: Neue Module in MorphDyn

Modul: Wandstärke der Kraterstrukturen

```
function [center_point_hdr] =
module_select_many_profiles(path,fname,fname2,fname3,roi_id,img_hdr,
img_arr,new_select_center_point,new_calc,vis_star_profiles,vis_width
_mean,load_width_mean,load_width_mean1,profile_length,phi,delta_x,de
gpoly,depth_start,height_step);

disp('<module_select_center_point>');

if new_select_center_point

      % selection of the center point
      [center_point_hdr] = select_center_point(img_hdr,img_arr);
end

% saving the center point header to binary data file
save_bin_center_point_hdr(center_point_hdr,...

[path,'\data\images\',roi_id,'\',roi_id,'_center_point.hdr']);
 else
       % loading the center point header from a binary data file
      center_point_hdr = load_bin_center_point_hdr...

([path,'\data\images\',roi_id,'\',roi_id,'_center_point.hdr']);

end
if new_calc
% printing header info
  hdrstr = 'Coordinates of Center Point:';
  print_center_point_hdr(hdrstr,center_point_hdr);

% definition of rotation angle
  rot_degphi = [phi:phi:360];
  phipi = (2*pi*phi)/360;
  rot_phi = [phipi:phipi:2*pi];

% Endpunkte der Profillinien
  xend = center_point_hdr.cx+profile_length*cos(rot_phi);
  yend = center_point_hdr.cy+profile_length*sin(rot_phi);

% definition of profile axe
  li = [0:delta_x:profile_length];

% calculation of x- an y-coordinates of the profile axe
m = 360/phi;
for n = 1:m;
   yi{n} = li*sin(rot_phi(n))+center_point_hdr.cy;
   xi{n} = center_point_hdr.cx+li*cos(rot_phi(n));

% initialization of survey coordinate grid
  x_vec = [1:img_hdr.nx]*img_hdr.delta_x-img_hdr.nx/2;
  y_vec  = transpose([1:img_hdr.ny]*img_hdr.delta_y-img_hdr.ny/2);
  [x_arr,y_arr] = meshgrid(x_vec,y_vec);

% interpolation of depth_vec on the profile lines
   [x{n},y{n},z{n}] =
griddata(x_arr,y_arr,img_arr,xi{n},yi{n},'cubic');

% polynomial p{n} that fits the data
   p{n} = polyfit(li,z{n},degpoly);
   f{n} = polyval(p{n},li);
```

```
% visualization
   if vis_star_profiles
      figure
      plot(li,z{n},'-b');
      hold on;
      plot(li,f{n},'-r');
      xlabel('pos [m]');
      ylabel ('water depth [m]');
      set(gca,'YDir','reverse');
      title(['Profile ',num2str(n),', Rotation Angle =
',num2str(rot_degphi(n)),'°']);
   end

% roots of p{n}-h
   h0 = [0:height_step:depth_start];
   h = fliplr(h0);
   index_vec = [];
   j = (depth_start/height_step)+1;
   for I = 1:j;
      ph{n,I} = p{n};
      ph{n,I}(degpoly+1) = p{n}(degpoly+1)-h(I);
      r{n,I} = roots(ph{n,I});
      index{I} = find(imag(r{n,I})==0);
      r{n,I} = r{n,I}(index{I});
      index{I} = find(r{n,I}<profile_length&r{n,I}>0);
      r{n,I} = r{n,I}(index{I});
      size_vec = size(r{n,I});

      if size_vec(1) == 2
         width{n,I} = r{n,I}(1)-r{n,I}(2);
      else
         width{n,I} = NaN;
      end
      w(n,I)=width{n,I};
   end
end
width_mean = nanmean(w);

save_ascii_table2(h,width_mean,[path,'\data\incoming\',fname
'_width_mean']);
end

% visualization of mean width
if vis_width_mean
     figure
 if new_calc
     plot(width_mean,h,'-b');
     hold on;
 end
     if load_width_mean
      [h2,width_mean2] = load_ascii_table2([fname2 '_width_mean']);
      plot(width_mean2,h2,'-r');
     end
     hold on;
     if load_width_mean1
      [h3,width_mean3] = load_ascii_table2([fname3 '_width_mean']);
      plot(width_mean3,h3,'-g');
     end
     hold on;
     xlabel('width_mean [m]');
     ylabel ('water depth [m]');
     set(gca,'YDir','reverse');
     title(['Crater Width']);
end
```

Modul: Tiefenabhängige Volumenuntersuchung

```
function [sum_N,depth_vec] =
module_area_analysis(fname,fname2,path,survey_id,roi_id,vis_ar
ea_analysis,...
    load_area_analysis,min,max,step);

% loading the region of interest (ROI) header from a binary
data file
   roi_hdr = load_bin_hdr...
      ([path,'\data\images\',roi_id,'\',roi_id,'.hdr']);
% loading the region of interest (ROI) depth image array from
a binary data file
   roi_arr = load_bin_arr(roi_hdr,...

[path,'\data\images\',roi_id,'\',survey_id,'\',roi_id,'_',surv
ey_id,'.arr']);


  [sum_N,depth_vec] =
area_analysis(roi_hdr,roi_arr,min,max,step);

% save ascii table

save_ascii_table2(sum_N,depth_vec,[path,'\data\incoming\',fnam
e '_area_analysis']);


% visualization of area analysis
if vis_area_analysis
   figure
   plot(depth_vec,sum_N,'-b');
   xlabel ('water depth [m]');
   ylabel('Area [m²]');
   title(['Area Analysis']);
   hold on;
   if load_area_analysis
      [sum_N2,depth_vec2] = load_ascii_table2([fname2
'_area_analysis']);
      plot(depth_vec2,sum_N2,'-r');

      diff_area = sum_N2-sum_N';

      figure
      plot(depth_vec,diff_area,'-b');
      xlabel ('water depth [m]');
      ylabel('Area [m²]');
      title(['Difference']);
   end
end
```

Modul: Varianz der Laplace-Pyramide

```
function [n,V] =
module_laplacian_pyramid(path,fname,fname2,fname3,img_arr,m,..
.

vis_variance,load_variance2,load_variance3,vis_gaussian_pyrami
d,vis_laplacian_pyramid);
```

```
% definition of filter
B4 = 1/16*[1 4 6 4 1];

offset = mean(mean(img_arr));
img = img_arr-offset;
G{1} = img;
[nx,ny]= size(img);
first_x = nx/8;
last_x = nx-nx/8;
first_y = ny/8;
last_y = ny-ny/8;

for n = 1:m
    % calculation of Gaussian Pyramid
    G_B4{n} = conv2(B4,B4,G{n});
    G_small{n} = G_B4{n}(1:2:end,1:2:end);
    G{n+1} = conv2(B4,B4,G_small{n}); % next level of Gaussian
Pyramid
   if vis_gaussian_pyramid
    figure
    surf(G{n},'FaceColor','interp','EdgeColor','none',...
      'FaceLighting','phong')
    title(['Gaussian Pyramid, Level ',num2str(n-1)]);
    % CAMLIGHT(45,15);
    %'Axis Object Properties'
    set(gca,'ZDir','reverse');
    %'Figure Object Properties'
   end
end
for n = 1:m
    % resize image
    G_resize{n+1} = imresize(G{n+1},[nx ny],'bilinear');
end

% calculation of Laplacian Pyramid
L_edge{1} = G{1}-G_resize{2};

for n=2:m
    L_edge{n} = G_resize{n}-G_resize{n+1};
end
for n=1:m
% edge
L{n} = L_edge{n}(first_x:last_x,first_y:last_y);
        % calculation of variance
    V(n) = mean(mean(L{n}.*L{n}));

  if vis_laplacian_pyramid
    figure
    surf(L{n},'FaceColor','interp','EdgeColor','none',...
     'FaceLighting','phong')
    title(['Laplacian Pyramid, Level ',num2str(n-1)]);
    % CAMLIGHT(45,15);
    %'Axis Object Properties'
    set(gca,'ZDir','reverse');
    %'Figure Object Properties'
   end
end

n = [1:m];
level = n-1;
```

```
save_ascii_table2(level,V,[path,'\data\incoming\',fname
'_variance']);

% visualization
if vis_variance
   figure
   plot(level,V,'-b');
   hold on;
   if load_variance2
      [level2,V2] = load_ascii_table2([fname2 '_variance']);
      plot(level2,V2,'-r');
   end
   if load_variance3
      [level3,V3] = load_ascii_table2([fname3 '_variance']);
      plot(level3,V3,'-g');
   end
   xlabel('Level');
   ylabel ('Varianz');
   title(['Rauhigkeit']);
end
```

Danksagung

Ich möchte mich bei Prof. Dr. Franz Jacobs (Universität Leipzig), Prof. Dr. Jan Harff (Institut für Ostseeforschung, Warnemünde) und Dr. Rolf Riethmüller (GKSS, Geesthacht) für die Bereitstellung dieses hochinteressanten und lehrreichen Diplomthemas bedanken.
Von unschätzbarer Hilfe waren mir die zahlreichen produktiven Gespräche mit Dr. Rolf Riethmüller und seine gute Betreuung.
Dipl. Ing. Martina Heineke (GKSS, Geesthacht) danke ich für ihre Einführung in die Software. Auch ihre Antworten auf unzählige technische und organisatorische Fragen waren mir von großem Nutzen.
Besonders wertvoll waren die geduldigen Erklärungen und kreativen Lösungsvorschläge, die ich von Dr. Jörg Seemann (Fa. V2T, Geesthacht) für die Arbeit mit den Programmen MorphDyn© und Matlab© erhielt.
Steffen Pausch und Wolfgang Sombrowsky (Fa. Simrad) verschafften mir Zugang zu ausführlichem Bildmaterial zur Erklärung des Fächerecholotsystems und waren mir auch bei der Beschreibung zahlreicher technischer Details eine große Hilfe.
Ich hatte auch das große Vergnügen, an Messkampagnen vor der Küste Warnemündes und im Hörnumbecken teilnehmen zu dürfen. Für die angenehme Atmosphäre an Bord der LUDWIG PRANDTL möchte ich der Besatzung des Forschungsschiffes herzlich danken.
Zuletzt möchte ich allen Mitarbeitern der Abteilung Küstenozeanographische Messsysteme (KOK) der GKSS für ihre Unterstützung und das nette Arbeitsklima meinen Dank aussprechen.

Karina Stockmann