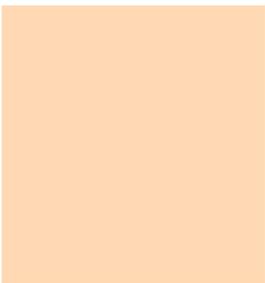


# ABSCHLUSSBERICHT

KoDiBa

Entwicklung und Implementierung von Methoden zur Aufbereitung  
konsistenter digitaler Bathymetrien

Förderkennzeichen: 03 KIS 042



**smile consult GmbH**  
**Vahrenwalder Strasse 7**  
**30165 Hannover**



## *Abschlussbericht*

---

### *KoDiBa – Entwicklung und Implementierung von Methoden zur Aufbereitung konsistenter digitaler Bathymetrien*

#### **Abschlussbericht**

Zahlungsempfänger: smile consult GmbH  
Vahrenwalder Straße 7  
30165 Hannover

Förderkennzeichen: 03 KIS 042

Vorhabensbezeichnung:  
KoDiBa – Entwicklung und Implementierung von Methoden zur  
Aufbereitung konsistenter digitaler Bathymetrien

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2002–30.09.2004

Berichtszeitraum: 01.10.2002–30.09.2004

Hannover, den 10.05.2005 Peter Milbradt  
Frank Sellerhoff  
Nils Krönert

**smile consult GmbH**  
Vahrenwalder Strasse 7  
30165 Hannover

Fon 0511/9357–620  
Fax 0511/9357–629

sellerho@smileconsult.de  
www.smileconsult.de

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
	1.1 Veranlassung und Zielsetzung .....	1
	1.2 Das Projektgebiet .....	2
	1.3 Digitale Geländemodelle .....	4
<b>2</b>	<b>Datengrundlage</b> .....	<b>6</b>
	2.1 Datenbasis .....	7
	2.1.1 Seevermessung .....	7
	2.1.2 Archivierungsformate .....	9
	2.2 Datenqualität .....	14
	2.2.1 Fehlerquellen .....	14
	2.3 Metadaten .....	16
	2.4 Datenmodell .....	18
<b>3</b>	<b>Datenanalyse</b> .....	<b>21</b>
	3.1 Bestimmung der Aussagebereiche .....	22
	3.1.1 Räumlicher Aussagebereich .....	22
	3.1.2 Zeitlicher Aussagebereich .....	22
	3.2 Verifikation .....	24
	3.2.1 Metadatenkonsistenz .....	24
	3.2.2 Identische Punkte .....	24
	3.2.3 Lagegleiche Punkte .....	25
	3.3 Fehleranalyse .....	26
	3.3.1 Konzept .....	26
	3.3.2 Fehlerindikationen .....	28

	3.4 Strukturerkennung .....	30
	3.4.1 Räumliche Struktur von Vermessungsdaten .....	30
	3.4.2 Bathymetrische Strukturen .....	32
	3.5 Analysen auf den Metadaten .....	35
<b>4</b>	<b>Bathymetriesimulation .....</b>	<b>37</b>
	4.1 Interpolation im Raum .....	38
	4.1.1 Interpolation auf Dreiecksnetzen .....	39
	4.1.2 Sibson–Interpolation .....	40
	4.1.3 Shepard-Interpolation .....	40
	4.1.4 Rasterapproximation .....	41
	4.1.5 Vergleich der räumlichen Interpolationen .....	42
	4.2 Bathymetriesimulation mit Trennung von Raum und Zeit .....	45
	4.2.1 Aufprägen .....	46
	4.2.2 Lineare Interpolation .....	47
	4.2.3 Shepard-Interpolation .....	48
	4.2.4 Weitere Interpolationen und Approximationen .....	49
	4.3 Bathymetriesimulation in Raum und Zeit .....	50
	4.3.1 Globale Raum-Zeit-Interpolation .....	50
	4.3.2 Lokale Raum-Zeit-Interpolation .....	51
	4.3.3 Netzbasierte Raum-Zeit-Interpolation .....	53
	4.3.4 Vergleich der Raum-Zeit-Interpolationen .....	54
	4.3.5 Bestimmung morphologischer Geschwindigkeiten .....	59
	4.4 Bewertung der Interpolierten digitalen Bathymetrien .....	61
<b>5</b>	<b>Analysen auf den digitalen Bathymetrien .....</b>	<b>64</b>
	5.1 Zeitliche Analysen .....	64
	5.1.1 Extremwertbestimmung .....	65
	5.1.2 Tiefenänderungsrate .....	66
	5.1.3 Zeitpunkt des Minimums .....	68
	5.2 Fehlerindikator in der Zeit .....	71
<b>6</b>	<b>Web-Portal KoDiBa .....</b>	<b>73</b>
	6.1 Inhalte .....	73
	6.1.1 Statische Inhalte .....	73
	6.1.2 Ansicht der bathymetrischen Vermessungsdaten .....	74
	6.1.3 Metadaten-Viewer .....	75
	6.1.4 Bathymetriesimulation .....	76
	6.1.5 Animation der Tiefenentwicklung .....	77

---

6.2 Technische Umsetzung .....	78
6.2.1 Konzept .....	78
6.2.2 Datenmanagement .....	79
6.2.3 Anwendungslayer .....	79
6.2.4 Präsentationslayer .....	80
6.2.5 Prozessketten .....	80
6.2.6 Integration in NOKIS++ .....	81



<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>82</b>
---------------------------------	-----------



<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>84</b>
8.1 Elektronische Medien .....	85

---

# Einleitung



## 1.1 Veranlassung und Zielsetzung

Regelmäßig durchgeführte Seevermessungen bilden die Datengrundlage für großräumige Betrachtungen der Tiefenverteilung entlang der deutschen Küsten. Der Vergleich solcher Tiefenverteilungen aus unterschiedlichen Epochen ermöglicht die Beurteilung der morphologischen Veränderungen in diesen Gebieten. Insbesondere für aktuelle Fragestellungen im Zusammenhang mit einem Meeresspiegelanstieg infolge Klimaänderung und der Stabilität des Festlandssockels muss eine brauchbare digitale Basistopographie für die gesamte Küstenzone verfügbar sein.

Die unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte sowie die vielfältigen Aufnahmeverfahren, die ihrerseits unterschiedliche räumliche Auflösungen besitzen, führen jedoch zu Schwierigkeiten bei der Erstellung von quasi-synoptischen Bathymetrien.

Die Qualität solcher quasi-synoptischen Bathymetrien hat einen wesentlichen Einfluss auf die Vertrauenswürdigkeit abgeleiteter Aussagen, wie die Bestimmung von Volumendifferenzen oder die Beurteilung der Stabilität von Küstenabschnitten. Insbesondere bei deren Nutzung zur Erstellung von Referenz-Bathymetrien für numerische Simulationsmodelle und Sedimentbilanzierungen führen Inkonsistenzen und Fehler zu irreführenden Ergebnissen und unter Umständen zu falschen Aussagen.

Im Zentrum des im Oktober 2002 begonnenen KFKI-Projektes "Entwicklung und Implementierung von Methoden zur Aufbereitung konsistenter digitaler Bathymetrien – KoDiBa" stand die Entwicklung und Implementierung von Algorithmen zur Generierung konsistenter digitaler Bathymetrien. Die entwickelten Methoden wurden an ausgewählten Naturdatensätzen getestet. Die Ergebnisse werden im Rahmen eines Web-Portals präsentiert und in das Nord-Ostsee-Küsten-Informationssystem (NOKIS) integriert.

Die Abbildung von Geländeoberflächen in einer rechnergestützten Umgebung wird als digitale Geländemodellierung bezeichnet. Werden unter Wasser liegende Tiefenverteilungen betrachtet so wird häufig von Bathymetrie bzw. digitaler Bathymetrie gesprochen. Die in KoDiBa zu entwickelnden Methoden sind im Allgemeinen nicht auf Tiefenverteilungen unterhalb des Meeresspiegels beschränkt. Die besondere Herausforderung im Projekt KoDiBa besteht jedoch in der Berücksichtigung der zeitlichen als auch

räumlichen Veränderlichkeit der Bathymetrie in der Küstenzone. Die Tide und der durch die Meteorologie getriebene Seegang führen zu ständigen Umlagerungen von Sedimenten und somit zu einer ständigen Veränderung der Tiefenverhältnisse.

## 1.2 Das Projektgebiet

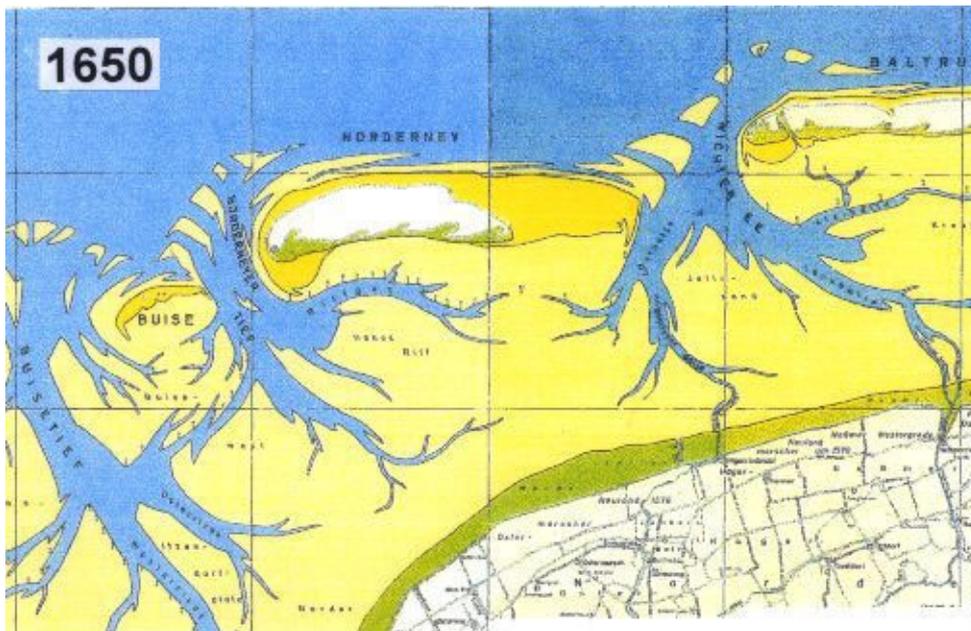
Die im Projekt KoDiBa entwickelten Verfahren zur Erstellung konsistenter digitaler Geländemodelle wurden an ausgewählten Datensätzen des Projektgebietes (Abbildung 1–1) erprobt und dokumentiert. Das in Abstimmung mit der projektbegleitenden Gruppe gewählte Gebiet umfasst den Bereich um die ostfriesischen Inseln Borkum, Juist, Norderney und Baltrum sowie den Bereich vor dem Festland von Norden und erstreckt sich über eine Fläche von ca. 1000 km<sup>2</sup>.



**Abbildung 1-1** Lage und Ausdehnung des Projektgebietes

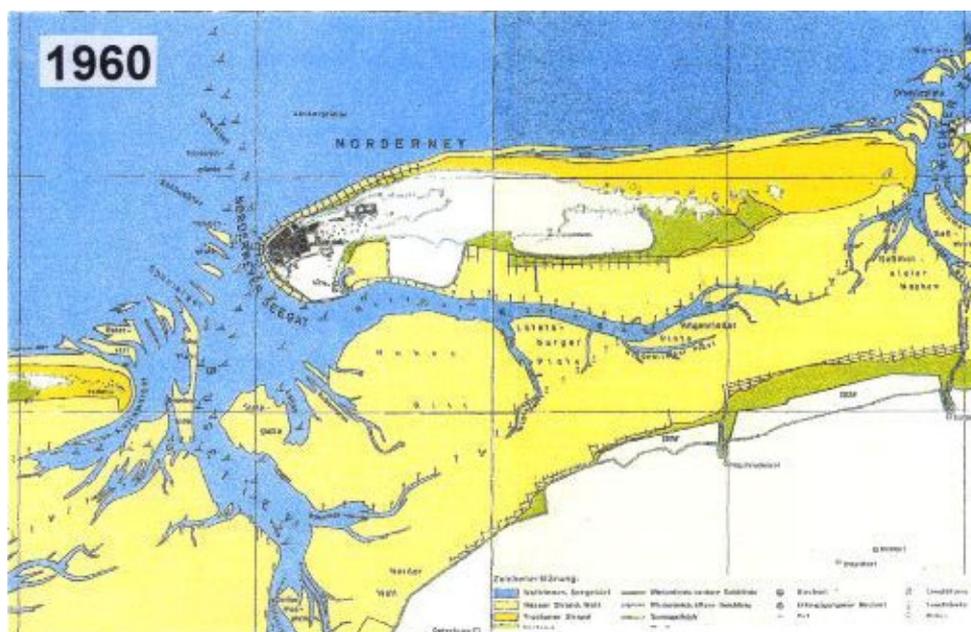
Die in Abbildung 1–1 zu erkennenden ausgedehnten Wattflächen, die zweimal täglich überflutet werden und wieder trocken fallen, sind charakteristisch für die gezeitengeformte deutsche Nordseeküste. Mit jeder einlaufenden Tide kann es auf den Wattflächen und in den diese durchziehenden Tiderinnen und Prielen zu Veränderungen der Tiefenverteilungen kommen.

Neben diesen täglichen Veränderungen ist das Gebiet der ostfriesischen Inseln durch langfristige und großräumige Veränderungen gekennzeichnet. Am Beispiel der Entwicklung der Insel Norderney über die letzten 350 Jahre werden diese Veränderungen kurz charakterisiert.



**Abbildung 1-2** Insel Norderney im Jahre 1650 (aus der Arbeit der Geomorphologischen Arbeitsgruppe)

Auf Grund der Lage der Insel Norderney in der Deutschen Bucht und den meteorologisch vorherrschenden Wettersituationen aus westlichen und nördlichen Richtungen ist eine großräumige Tendenz des Sedimenttransportes von West nach Ost zu beobachten. Zum einen kommt es im Bereich der westlichen Inselbereiche zu erheblichen Landverlusten, die nur durch das massive Eingreifen des Menschen verlangsamt werden können und zum anderen kommt es zum Anwachsen der Insel im Osten. Diese Veränderungen gehen einher mit kurz- und langfristigen Veränderungen einzelner Rinnen und Wattbereiche.



**Abbildung 1-3** Insel Norderney im Jahre 1960 (aus der Arbeit der Geomorphologischen Arbeitsgruppe)

Diese teilweise starke Dynamik der bathymetrischen Veränderungen wird von unterschiedlichen Institutionen, entsprechend ihren Aufgaben, durch Vermessungen beobachtet. Diese verschiedenen Zielsetzungen führen allerdings zu unterschiedlichen Vermessungsintervallen und Bearbeitungsweisen.

Die bathymetrischen Vermessungsdaten für das Untersuchungsgebiet wurden von dem Wasser- und Schiffsamt (WSA) Emden und dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) bereitgestellt. Das BSH hat unter anderem die Aufgabe Seekarten zu erstellen, während das WSA Emden im Wesentlichen für die Fahrwasserunterhaltung und Strombaumaßnahmen zuständig ist. Dies führt dazu, dass das WSA Emden hauptsächlich Vermessungen in den Fahrrinnen und Prielen durchführt, während das BSH seine Vermessungen großflächig anlegt.

Für das Untersuchungsgebiet konnten insgesamt Daten aus vierzehn aufeinander folgenden Jahren (1989 - 2003) bereitgestellt werden. Die zugehörigen Vermessungsdaten besitzen ein Volumen von ca. 10 Millionen Messpunkten.

## 1.3 Digitale Geländemodelle

Digitale Geländemodelle stellen eine vereinfachte Beschreibung von Geländeoberflächen in digitaler Form dar. Sie basieren auf Geodaten, die durch eine Interpretation in ein Modell überführt werden. Der Begriff des Digitalen Geländemodells wurde in den 60er-Jahren geprägt und wird in unterschiedlicher Weise verwendet.

In der Vergangenheit wurde die Zeit bei der Charakterisierung von Geländemodellen nur selten berücksichtigt. Die klassischen Betrachtungen und Definitionen im Umfeld digitaler Geländemodelle gehen davon aus, dass alle Daten zu einem einheitlichen Zeitpunkt vorliegen.

Man unterscheidet rasterbasierte digitale Geländemodelle und solche auf der Basis von Dreiecksnetzen. Die Stützstellen solcher Modelle basieren in der Regel auf Vermessungsdaten. Durch die stärkere Berücksichtigung der Zeit bei der Modellbildung digitaler Geländemodelle, entsteht die Notwendigkeit auch die bereitgestellten Vermessungsdaten mit zugehörigen Zeitangaben zu versehen. Im Kapitel 2 wird speziell auf die Anforderungen an die zugrundeliegenden Vermessungsdaten eingegangen und auf die besondere Bedeutung der zugehörigen Metadaten hingewiesen.

Wenn von Geländemodellen im Küstenbereich gesprochen wird, wird häufig zwischen Topographie und Bathymetrie unterschieden.

**Topographie** (griechisch *topos*="Ort, Lage" und *graphein*="schreiben") bezeichnet die Wissenschaft der Erfassung eines Teilgebiets der Erdoberfläche (Gelände). Sie kann der Geographie zugeordnet werden, die sich mit Zusammenhängen der Erdoberfläche als Ganzes beschäftigt. Auch die Repräsentation einer Geländeoberfläche wird als Topographie bezeichnet.

**Bathymetrie** (griechisch *bathos*=”Tiefe” und *metro*=”Messen”): Das Wort “Bathymetrie” bedeutet Tiefenmessung, es wird im Allgemeinen jedoch als die Wissenschaft der Vermessung des Meeresbodens verstanden. Die Bathymetrie kann als die Topographie des Meeresbodens aufgefasst werden. Häufig wird der Begriff auch als Bezeichnung einer bestimmten Meeresbodentopographie verwendet, man spricht beispielsweise von der Bathymetrie der Nordsee.

Im Rahmen des Forschungsprojektes KoDiBa musste die klassische Modellvorstellung des digitalen Geländemodells bzw. der digitalen Bathymetrie generalisiert werden. Sowohl die Berücksichtigung von Vermessungsdaten mit Orts- und Zeitbezug als auch die im Kapitel 4 dargestellten Orts-Zeit-Interpolationen legen es nahe, ein digitales Geländemodell als die Menge aller Vermessungsdaten mit zugehöriger Interpretationsvorschrift (Interpolations- und Approximationsmethoden) aufzufassen. Hieraus ergeben sich neue Anforderungen sowohl an die Verwaltung der Vermessungsdaten als auch an die zugehörigen Metadaten (siehe Kapitel 2.4 und 2.5) sowie an die Interpolationsmethoden (siehe Kapitel 4).

Neben der Entwicklung und prototypischen Umsetzung von Verfahren zur Generierung konsistenter digitaler Bathymetrien lag ein weiterer Schwerpunkt in der Anwendung der Verfahren auf reale Vermessungsdaten des Projektgebietes. Hierdurch konnten sowohl die Möglichkeiten als auch die Grenzen der entwickelten Verfahren aufgezeigt werden.

Vermessungen des Meeresgrundes werden in Deutschland von verschiedenen Institutionen mit unterschiedlichen Zielsetzungen durchgeführt. Entsprechend der Verfügbarkeit der Ressourcen als auch der Anforderungen an die Genauigkeit der Vermessungen kommen unterschiedliche Vermessungsverfahren zum Einsatz. Für die Beurteilung der Qualität und Vertrauenswürdigkeit der aus diesen Daten erstellten digitalen Bathymetrien ist zunächst die Beurteilung der verwendeten Vermessungsdaten eine wesentliche Voraussetzung.

Für das KoDiBa-Projektgebiet wurden Vermessungsdaten aus vierzehn aufeinander folgenden Jahren (1989 - 2003) herangezogen. Die datenerhebenden Dienststellen sind das Wasser- und Schifffahrtsamt Emden (WSA Emden) sowie das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie in Hamburg (BSH). Die gemessenen Daten der Ämter werden in der Regel in der Peildatenbank-Küste (PDBK) der Fachstelle für Informationstechnik der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung bei der Bundesanstalt für Wasserbau in Ilmenau (F-IT Ilmenau) archiviert.

In den folgenden Abschnitten soll auf für die Erstellung konsistenter Digitaler Geländemodelle, relevante Aspekte der Datenbasis, der Datenqualität und der Bedeutung der Metadaten eingegangen werden. Zum Abschluss wird auf das in KoDiBa entwickelte Datenmodell näher eingegangen.

## 2.1 Datenbasis

Bei der Erstellung eines Digitalen Geländemodells ist es von Vorteil, über die Herkunft der als Grundlage dienenden Daten umfassend informiert zu sein. Im Bereich der Geodaten können zahlreiche Messverfahren der Datengewinnung dienen. Im Bereich der bathymetrischen Vermessungen sind hauptsächlich hydroakustische Verfahren wie die Echolotung im Einsatz, die auch als Sonar bezeichnet wird. In letzter Zeit werden auch optische Verfahren wie die Laser-Scan-Befliegung zur Ermittlung von Meeresboden- und Küstentopographien eingesetzt. Eine Vermessung durch Befliegung ermöglicht die quasi zeitgleiche Aufnahme großer Flächen in hoher Dichte. Solche Verfahren sind jedoch nur für trockene Bereiche bzw. für geringe Wassertiefen geeignet.

### 2.1.1 Seevermessung

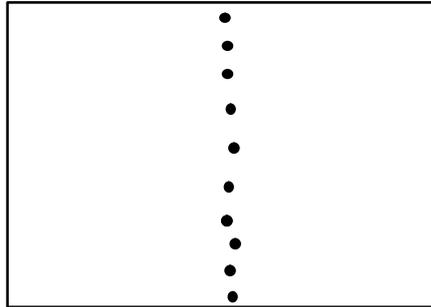
Die Seevermessung dient der Erfassung des Gewässergrundes. Da dieser in der Regel nicht direkt zugänglich und damit nicht direkt messbar ist, muss der Gewässergrund durch eine Tiefenmessung von einem Schiff aus aufgenommen werden. Echolot-Verfahren sind im Zusammenhang mit der Vermessung des Meeresbodens am gebräuchlichsten. Dabei wird ein Schallimpuls generiert und in Richtung des Untergrundes abgestrahlt. Ein sogenannter Rekorder misst die Laufzeit des reflektierten Strahls vom Zeitpunkt des Absendens bis zur Wiederankunft beim Sender. Aus dieser Laufzeit kann die Entfernung zum Meeresboden ermittelt werden. In Verbindung mit der Bestimmung der Lage des Senders kann die Tiefeninformation einem Ort zugeordnet werden. Dies geschieht heutzutage meist mit Hilfe des Global Positioning Systems (GPS), dem satellitenbasierten Navigationssystem des amerikanischen Verteidigungsministeriums.

Sowohl die Bestimmung des Messortes, als auch die Tiefenermittlung werden durch die Lage des Peilschiffs zum Bezugshorizont beeinflusst. Im Zusammenhang mit der Bewegung des Schiffs spricht man von Hub (englisch: hub), Stampfen (pitch) und Rollen (roll). Dabei bezeichnet Hub die Bewegung lotrecht zum Wasserspiegel, Rollen die Bewegung um die Längsachse und Stampfen das seitliche Ausweichen. Vor allem durch das Rollen (Roll), dass Winkeländerungen der Schallstrahlen zur Folge hat, können sich große Abweichungen bei der Tiefenbestimmung ergeben. Neben Verwirbelungen und Dichteänderungen des Wassers bildet die Beschaffenheit des Untergrundes einen wesentlichen Unsicherheitsfaktor.

Im Folgenden soll kurz auf die Beschreibung der wichtigsten Verfahren zur Tiefenmessung durch Echolotung eingegangen werden. Diese sind die Linienpeilung, die Peilung durch Auslegersysteme und die Fächerecholotung. Die Unterschiede in den Eigenschaften der resultierenden Vermessungsdaten muss bei der Erstellung digitaler Geländemodelle berücksichtigt werden.

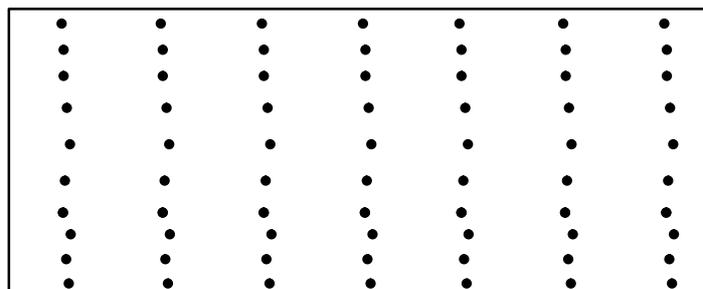
**Linienpeilung:** Die älteste und immer noch gebräuchliche Variante ist die Single-Beam-Echolotung, die auch als Linienpeilung bezeichnet wird. Sie arbeitet mit einem Messstrahl, der lotrecht zum Wasserspiegel abgesendet wird. Wegen dieser Eigenschaft wird sie auch Vertikalecholotung genannt.

Im Bug des Schiffes ist ein Schwingersystem angebracht, das den Messstrahl aussendet. Die resultierenden Punktdaten besitzen eine linienförmige Struktur mit charakteristischen Abständen von ca. 10 m innerhalb einer Linie und Linienabständen von bis zu 250 m.



**Abbildung 2-1** Typische Verteilung der Messpunkte einer Linienpeilung (Single-Beam-Echolotung)

**Auslegersystem:** Wegen der Nachteile bei der Peilung einzelner Linien, wurde Anfang der 50er Jahre in Deutschland ein System zur flächenhaften Messung von Tiefenwerten entwickelt. Es beruht auf zwei Auslegern, die an beiden Seiten des Schiffes angebracht sind. Neben dem Schwingersystem am Bug befinden sich weitere an den Auslegern, die in der Regel im Abstand von einem Meter angebracht sind. Mit einem solchen Auslegersystem (auch Bodenkartenschreiber genannt) können mehrere Messungen mit konstantem Seitenabstand durchgeführt werden. Die Struktur der aus der Vermessung mit Auslegersystemen resultierenden Punktdaten ist in Abbildung 2-2 beispielhaft dargestellt. Quer zur Fahrtrichtung liegt jeweils ein Streifen mit nahezu äquidistanten Punkten konstanter Anzahl vor. Dieser Querabstand ist erheblich kleiner als bei Daten aus der Linienpeilung. Mit der gleichen Anzahl von Peilfahrten läßt sich mit dem Auslegersystem ein Datensatz mit einer erheblich höheren Dichte erzeugen.

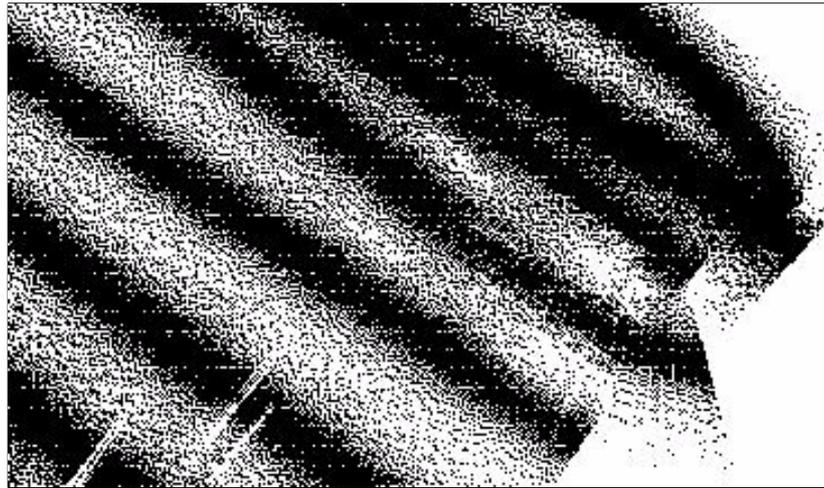


**Abbildung 2-2** Typische Verteilung der Messpunkte bei der Multi-Beam-Echolotung mit Ausleger

Die vorgestellten Multi-Beam-Auslegersysteme sind sehr aufwendig in ihrer Wartung und schränken die Manövrierfähigkeit des Peilschiffs stark ein. Sie werden daher hauptsächlich auf Binnenwasserstraßen und in Küstennähe eingesetzt.

**Fächerecholot:** In diesem Zusammenhang leistet eine andere Technik Abhilfe, bei der mit Hilfe eines oder zweier Schallerzeuger ein ganzes Feld von Messstrahlen ausgesendet wird. Aufgrund der fächerförmigen Aussendung der Schallwellen wird dieses System Fächerecholot genannt. Diese

Technik ist seit 1977 im Einsatz und wird vor allem im Bereich der Hochsee eingesetzt. Die Auswertung der ermittelten Laufzeiten gestaltet sich schwieriger als bei den anderen Verfahren. Die Fehleranfälligkeit der einzelnen Strahlen nimmt nach außen hin zu. Die Struktur der ermittelten Daten unterscheidet sich von der Struktur eines Datensatzes, der durch ein Auslegersystem bestimmt worden ist in Ausdehnung und Dichte. Vor allem ist die Breite des durch den Fächer abgedeckten Gebiets, anders als bei einem Auslegersystem, nicht konstant. Sie ist vielmehr von der Wassertiefe abhängig. Bei großer Tiefe bildet sich ein breiterer Fächer aus als bei geringer Wassertiefe.



**Abbildung 2-3** Typische Verteilung der Messpunkte bei der Fächerecholotung

Trotz der Unsicherheiten am Rand des Fächers, bietet diese Methode Vorteile. So ist beispielsweise in den Randbereichen des Scans keine freie Wasseroberfläche erforderlich, um eine Messung vorzunehmen. Somit ist es beispielsweise möglich, die Tiefen auch unter anderen Schiffen oder unter Bauwerken (z.B. Pontons) zu bestimmen.

Die unterschiedlichen Verteilungen der Messpunkte als auch die differierenden Genauigkeiten sind im Weiteren zu berücksichtigen.

### 2.1.2 Archivierungsformate

Neben den Datenerhebern verwenden auch weitere Institutionen die gemessenen Daten. Damit ein reibungsloser Austausch gewährleistet wird, werden einheitliche Archivierungsformate verwendet. Aufgrund der gestiegenen Anforderungen an die Messdaten unterliegen die Archivierungsformate jedoch einer ständigen Weiterentwicklung. Somit existiert zur Zeit kein einheitlicher Archivierungsstandard.

**Tripeldatenformat:** Das einfachste und älteste Format zur Beschreibung von Tiefendaten ist das Tripeldatenformat. Die Daten werden dabei in einer einfachen ASCII-Text-Datei gespeichert. Die zeilenweise Speicherung der Messpunkte gewährleistet den einfachen Import der Daten in Programmen und stellt ein plattformunabhängiges Format dar. Alle weiterführenden Informationen, wie Zeitpunkt oder Datenerheber müssen in Kommentarzei-

len oder separaten Dateien gespeichert werden. In der Praxis gehen diese Informationen derzeit häufig verloren.

**Kuefo90-Format:** Das Kuefo90-Format kann als ein erweitertes Tripelformat aufgefasst werden. Auch in diesem Format werden die Messpunkte zeilenweise als Datentripel gespeichert. Wesentliche Vorteile des Kuefo90-Formates sind die Verfügbarkeit zusätzlicher Metainformationen und die weiterhin gewährleistete Plattformunabhängigkeit durch die Nutzung des ASCII-Formates. Das Kuefo90-Format ist für die Speicherung von Linien-Peilungen entwickelt worden. Die Speicherung erfolgt in Blöcken, die aus beliebig vielen Zeilen bestehen können. Die Zeilen sind in drei verschiedene Typen gruppiert. Der Typ wird durch einen Buchstaben am Anfang jeder Zeile gekennzeichnet. Es werden Header-Informationen, Bezugslinien und Punkte unterschieden. Am Anfang eines jeden Blockes steht eine Header-Information und zeigt den Beginn einer neuen Peillinie an. Weiterhin enthält sie einige Metainformationen wie das Datum der Aufnahme und die Bezeichnung des Fahrwassers.

Nach der Header-Information folgen die Bezugslinien, welche den gewünschten Verlauf der Peillinie beschreiben. In einem Block können beliebig viele Bezugslinien definiert sein.

Die wichtigsten Informationen sind die Messpunkte bestehend aus den Lagekoordinaten (x,y-Koordinaten) und dem Messwert (z-Koordinate). Der Messwert wird in zwei verschiedenen Höhen Bezugssystemen, Normal-Null (NN) und Seekarten-Null (SKN), gespeichert.

```
H 2230101100540 1191 1200 91158 91884 -1200 214 200041
B 0 2591246.02 5886794.81 2591048.64 5887073.29 0.0000 -1
B 0 2591350.87 5886914.66 2591428.70 5887062.93 0.0000 0
B 0 2591428.70 5887062.93 2592062.18 5886730.43 0.0000 1
R 2542195.6 5940000.1 -9.23 -10.63
R 2542194.9 5940000.6 -9.13 -10.53
R 2542194.2 5940001.2 -9.11 -10.51
R 2542193.5 5940001.7 -9.15 -10.55

H 7110901140200 7000 300 298 -250 1200 214 200042
B 0 2576001.00 5946432.00 2574747.00 5947887.00 0.0000 0
R 2576030.7 5946855.1 -0.09 -1.59
R 2576030.5 5946854.9 -0.09 -1.59
R 2576029.8 5946854.3 -0.11 -1.61
```

**Abbildung 2-4** Ausschnitt aus einer Vermessungsdatei im Kuefo90-Format

Das für die Speicherung von Peildaten entwickelte und optimierte Kuefo90-Format ist zur Zeit noch das meist verwendete Format in den Wasser- und Schifffahrtsämtern. Durch die technische Entwicklung der Messgeräte hat die Fächerecholotung die Peillinien jedoch verdrängt. Das Kuefo90-Format ist für die Speicherung der Daten der Fächerecholotung wenig geeignet. Zwar ist es möglich, die gemessenen Punkte im Kuefo90-Format abzulegen, allerdings gehen dabei fächerecholottypische

Eigenschaften, wie z.B. der Strahlwinkel, verloren. Aus diesem Grunde wurde die Entwicklung eines neuen Formates (MBES-Format) notwendig.

**MBES-Format:** Um auch Fächerecholotdaten möglichst verlustfrei abspeichern zu können, wurde im Jahre 2002 ein spezielles Format von den Wasser- und Schifffahrtsämtern entwickelt. Aufgrund der großen Datenmengen wurde für das Multi-Beam-Echo-Sounder-Format (MBES-Format) ein binäres Dateiformat gewählt, was im Allgemeinen zu einer Plattformabhängigkeit führt.

Im Zuge der Neuentwicklung des MBES-Formates wurde auch über eine Erweiterung der zu speichernden Metainformationen diskutiert. Hierzu wurde von der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest (WSD Nordwest) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ein Metadatenkatalog definiert. So wird in dem MBES-Format neben dem Datum der Entstehung beispielsweise auch die Bundeswasserstraßennummer, der Projektname, das Peilgebiet, das Lagesystem und das Höhensystem gespeichert. Neben den vordefinierten Metadaten besteht auch die Möglichkeit durch eine externe XML-Datei weitere Metainformationen zu speichern. Damit kann das Format bei einer späteren Erweiterung der Metadaten eingesetzt werden.

```
Wasserstrassennummer 7001 Dienststellennummer 213
Schiffsname Jade Projektname Drempeptest Auftragsname EIVA
Datum 2003-11-3 07:48:29
MinRechts 3444079.5 MinHoch 5933132.0 MaxRechts 3444193.7 MaxHoch 5933327.1
AnzTiefen 227783 Lagestatus Datum Rauenberg HoehenStatus NN
R 3444056.77 H 5933167.05 T -13.41 Stat ACTIVATED
R 3444056.86 H 5933166.96 T -13.42 Stat ACTIVATED
R 3444057.31 H 5933166.54 T -13.49 Stat ACTIVATED
R 3444057.37 H 5933166.48 T -13.51 Stat ACTIVATED
R 3444057.73 H 5933166.14 T -13.43 Stat ACTIVATED
R 3444057.66 H 5933166.21 T -13.56 Stat ACTIVATED
```

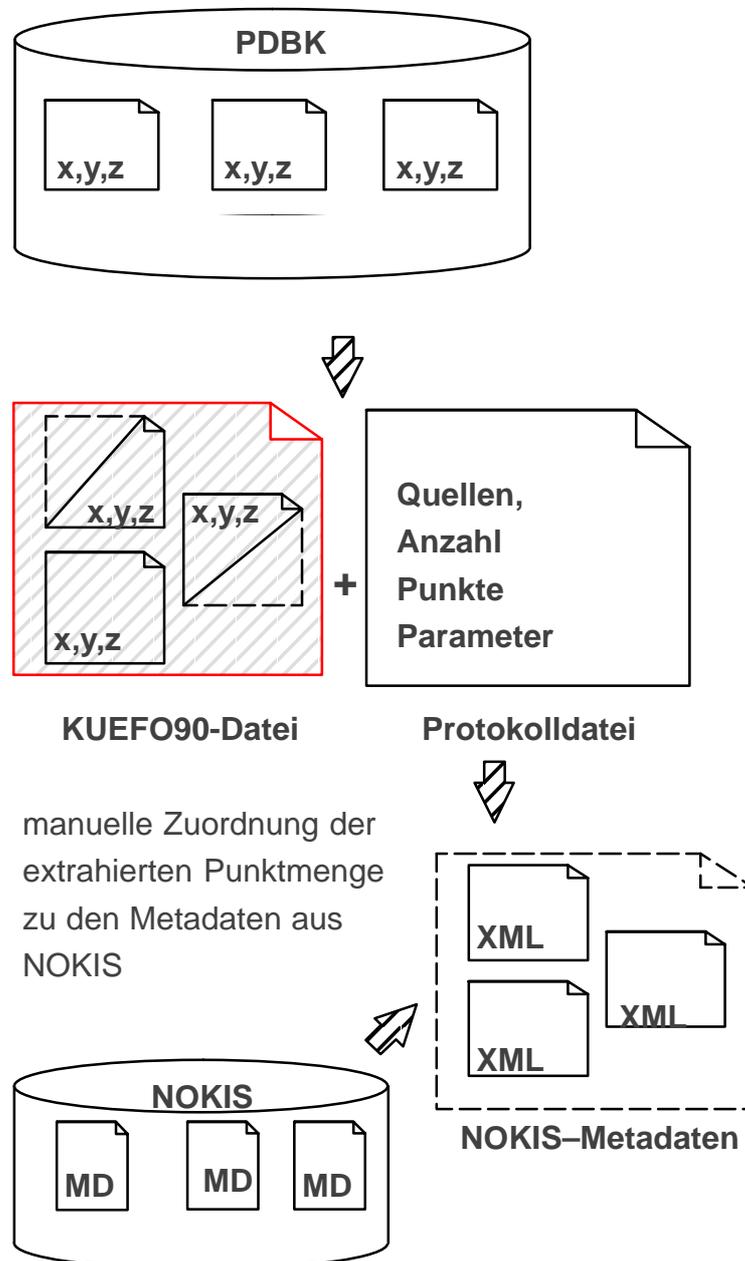
**Abbildung 2-5** Ausschnitt aus einer Vermessungsdatei im MBES-Format

Die Vermessungsdatei in Abbildung 2-5 zeigt eine Auswahl der Metainformationen und einige Messpunkte. Auffallend ist die Vielfalt der Metadaten sowie die Kennzeichnung des Bearbeitungsstatus jedes Vermessungspunktes. Durch die Verarbeitung und Plausibilisierung der Daten kann der Bearbeitungsstatus verändert werden. So ist es zum Beispiel möglich, dass der Punkt aufgrund der Plausibilisierung herausgenommen wird, was sich in einer Änderung des Bearbeitungsstatus ausdrückt.

**Archivierung:** Die beschriebenen Formate sind für die Speicherung einzelner Messungen ausgelegt, da jede Messung eine kompakte Einheit bildet. Um die Gesamtheit der Daten erfassen zu können, bedarf es eines Archivierungssystems. Für die Daten der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung in Deutschland wurde ein zentrales Archivierungssystem, die Peildatenbank Küste (PDBK) aufgebaut. Die PDBK wird von der Fachstelle der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung für Informationstechnik (F-IT) in Ilmenau betreut.

Wie schon in der Einleitung kurz beschrieben, wurde im Projekt NOKIS ein Metadateninformationssystem für das Küsteningenieurwesen geschaffen. In

diesem Informationssystem sind während der Projektlaufzeit von NOKIS auch die Metadaten der PDBK eingepflegt worden. Allerdings waren der Selektionsmechanismus der PDBK und die Metadaten aus NOKIS nicht aufeinander abgestimmt.



**Abbildung 2-6** Extraktion von Daten und Metadaten aus der PDBK und NOKIS

Die Abbildung 2-6 zeigt die Problematik des im Projektzeitraum zur Verfügung stehenden Selektionsmechanismus. Für die Extraktion von Daten aus der PDBK musste ein Zeitraum (meistens ein Jahr) und eine rechteckige Umrandung des zu selektierenden Gebietes angegeben werden. Anhand dieser Informationen werden die zugehörigen Messpunkte in der PDBK selektiert und in eine Datei exportiert. Zusätzlich wird eine Protokolldatei erzeugt, die unter anderem Angaben über die Anzahl der Messpunkte und

der betroffenen Messungen enthält. Da die selektierten Messungen allerdings in einer Datei (vereinigt) exportiert wurden, konnte im Nachhinein nicht mehr eindeutig festgestellt werden, aus welcher Messung der einzelne Messpunkt stammt. Die Beschränkung auf rechteckige Abfragebereiche führt weiterhin dazu, dass in der Regel nur Teile von Messkampagnen selektiert wurden. Die in der Protokolldatei zusammengestellten Metadaten beziehen sich jedoch auf die gesamte Messung aus denen die Daten selektiert wurden. Dies erschwerte die Zuordnung von Daten und Metadaten erheblich.

Nur durch erheblichen Aufwand und teilweisen Rückgriff auf die Vermessungsdaten der datenerhebenden Stellen konnten die in KoDiBa notwendigen Daten mit Metadaten versehen werden.

## 2.2 Datenqualität

Unter der Qualität von Daten versteht man die Beschreibung der Güte der Daten. Hierbei kann zwischen der Genauigkeit und Zuverlässigkeit sowie Aktualität und Vollständigkeit der Daten unterschieden werden.

Die Genauigkeit beschreibt die Abweichung der Daten vom wahren Wert (oder wenn dieser nicht bekannt ist, vom Erwartungswert). Die Abweichung wird normalerweise in einer messbaren Einheit angegeben und aus einer statistischen Betrachtungen bestimmt, in der die Art der Datenermittlung berücksichtigt wird. Die Genauigkeit der Punktkoordinaten bathymetrischer Vermessungsdaten kann beispielsweise als mittlerer Lagefehler und mittlerer Tiefenfehler angegeben werden.

Die Zuverlässigkeit gibt an, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass für einen konkreten Anlassfall und zu einem konkreten Ort Daten vorhanden sind, wie groß der Umfang dieser Daten ist und wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass diese Daten auch korrekt sind. Dieser Wert kann entweder aufgrund der Erfassung der Daten geschätzt oder aus Stichproben berechnet werden.

Daten werden als konsistent bezeichnet, wenn sie inhaltlich und formal widerspruchsfrei sind. Dies bedeutet unter anderem, dass sie vollständig und homogen in ihrer Genauigkeit sind.

### 2.2.1 Fehlerquellen

Vermessungsdaten sind grundsätzlich mit Erfassungs- und Verarbeitungsfehlern behaftet. Bei bathymetrischen Vermessungsdaten kommt erschwerend hinzu, dass "exakte" Vergleichsmessungen kaum möglich sind. Trotz einer stetigen Verbesserung der Messverfahren sind Messungenauigkeiten in der Tiefe und Lage entsprechend dem jeweiligen Verfahren zu berücksichtigen. Die Korrektur der unterschiedlichen Wasserstände wurde in der Vergangenheit über Wasserstandserrechnungskarten und entsprechende Pegel durchgeführt. Der Einsatz von GPS vereinfacht die Positionsbestimmung, ist aber auch mit entsprechenden Fehlern behaftet. Bevor auf weitere Fehlerquellen, beispielsweise solche, die durch die Weiterverarbeitung der Vermessungsdaten entstehen, eingegangen wird, soll auf die unterschiedlichen Aufgabenfelder der Datenerheber und deren Bedeutung für die Bewertung der Vermessungsdaten eingegangen werden.

Das Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Emden ist einer der Datenlieferanten für das KoDiBa-Projektgebiet. Das WSA Emden ist unter anderem für die Fahrwasserunterhaltung und Strombaumaßnahmen zuständig und konzentriert deshalb seine Vermessungen im Wesentlichen auf die Fahrrinnen und die angrenzende Wattbereiche. Die Aufnahmeintervalle sind relativ kurz und werden unter der Maßgabe der Identifikation von Untiefen durchgeführt, so dass hieraus Baggeraufträge abgeleitet werden können. Im Gegensatz hierzu führt das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) Seevermessungen unter anderem mit dem Ziel durch, Seekarten zu erstellen. Hierbei ist es im Allgemeinen ausreichend, von mittleren Tiefenverhältnissen auszugehen. Insbesondere in Bereichen mit erhöhtem Schlickanteil an der Gewässersohle können sich hieraus differierende Tiefen ergeben. Die unterschiedlichen Zielsetzungen bei der Datenaufnahme müssen bei der

Bewertung und späteren Nutzung solcher Vermessungsdaten in Interpolationsverfahren Berücksichtigung finden.

Die Weiterverarbeitung und Archivierung der Vermessungsdaten birgt weitere Fehlerquellen. Unterschiedliche Datenformate (z.B. Nachkommastellen) erschweren es im Nachhinein, gleiche Messwerte zu identifizieren bzw. erhöhen die Toleranz der Vermessungsdaten. Im Rahmen der Projektbearbeitung hat sich gezeigt, dass das Vernachlässigen der zeitlichen Angaben, z.B. durch das Archivieren mehrerer Messkampagnen in einer Datei oder einem Datensatz die Vermessungsdaten praktisch unbrauchbar machen kann.

Weitere Fehlerquellen können sich durch die Manipulation von Vermessungsdaten beispielsweise in Form von Raster- bzw. Vektorkonvertierungen und zugehörigen Interpolationen ergeben. Hierbei werden in den seltensten Fällen die verwendeten Interpolationsverfahren und deren zugehörige Fehlerfortpflanzung dokumentiert. Hiermit in Zusammenhang stehen unter Umständen auch die Wahl ungeeigneter Interpolationsverfahren oder die Berücksichtigung zu geringer Datendichten.

Für die Zukunft sollte angestrebt werden, so weit wie möglich auf gut dokumentierte Sekundärdaten mit zugehörigen Metadaten bei der Erstellung digitaler Geländemodelle zurückgreifen zu können.

## 2.3 Metadaten

Für die Beschreibung der Daten einer Messkampagne werden Metadaten verwendet. Diese sollten in der Regel den Zeitpunkt der Datenerfassung und die dabei verwendeten Verfahren, Angaben zur Datenqualität und zur numerischen Genauigkeit beinhalten. Sie sind im Allgemeinen fester Bestandteil von Datensätzen, die ohne Metadaten in den meisten Fällen wenig Aussagekraft besitzen.

Vermessungen der Gewässersohle werden zu verschiedenen Zeiten an verschiedenen Orten im Rahmen bestimmter Aufgabenstellungen durchgeführt. Durch Wiederholungen in regelmäßigen Abständen kann erreicht werden, die zeitliche Entwicklung der Gewässersohle zu beobachten. Würde nun der Aufnahmezeitpunkt der Messung unberücksichtigt bleiben, so entsteht ein großer Punkthaufen, der viele doppelte und lagegleiche Punkte enthält (siehe Kapitel 3.1). Wie im nachfolgenden Kapitel gezeigt wird, führen vor allem lagegleiche Punkte zu widersprüchlichen Informationen und verhindern eine sinnvolle Interpolation.

Sind den Vermessungen eindeutige Metainformationen, insbesondere die Aufnahmezeitpunkte, zugeordnet, so kann für die Verwendung der Punkte eine Ordnung festgelegt werden. Die zu verwendende Ordnung kann dabei vom Bearbeiter bestimmt werden. Es ist im Allgemeinen üblich, dem zeitlichen Aspekt das größte Gewicht zu verleihen. Genauso sind aber auch Ordnungen denkbar, bei denen bestimmten Messinstitutionen oder Messformaten der Vorzug gegeben wird.

Im Projekt NOKIS wurden Mindestanforderungen für den Aufbau der Metadaten im Küsteningenieurwesen entwickelt. Der NOKIS-Standard wurde in Anlehnung an den ISO 19115 Standard erstellt und bildet die Basis der in KoDiBa verwendeten Metadaten. Die Metadatenchnittstelle in KoDiBa wurde so konzipiert, dass ein Im- und Export zu den Metadaten von NOKIS jederzeit problemlos möglich ist. Somit wurde die Voraussetzung für die Anbindung des Projektes KoDiBa an das Projekt NOKIS geschaffen.

Als Metadaten werden folgende Elemente von NOKIS übernommen:

- Kurztitel
- Name, Organisation und Email des Datenerstellers
- Zusammenfassung und Zweck
- Status und Wartung der Daten
- Umschreibendes Rechteck
- verwendetes Koordinatensystem
- Bereich der Höhenwerte
- verwendetes Höhensystem
- Zeitraum der Aufnahme
- Anzahl und Typ der gespeicherten Objekte

Bei der Analyse der Metadaten zu Beginn der Projektlaufzeit zeigte sich, dass für das Projekt KoDiBa noch weiterführende Metadaten von Bedeutung

sind. So sind Informationen über die Art der Vermessung (Linienpeilung, Fächerecholot, Laser-Scan-Befliegung oder ähnliches) von großer Bedeutung, da je nach Art verschiedene Fehleridentifikatoren Verwendung finden. Weiterhin können die Analysen auf den Metadaten um ein vielfaches beschleunigt und präzisiert werden, wenn die Aussagebereiche der Daten detaillierter als ein umschreibendes Rechteck spezifiziert sind. In enger Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern von NOKIS wurde das NOKIS-Metadatenformat um Begrenzungspolygone (Aussagebereiche) erweitert.

## 2.4 Datenmodell

Für die im Rahmen des Projektes zu entwickelnden Methoden ist die Verfügbarkeit der Basisdaten als auch der Metadaten von herausragender Bedeutung. Aus diesem Grund wurden Anforderungen an ein Archivierungssystem formuliert, welches im Folgenden als reversibles Datenmodell bezeichnet werden soll.

Das System soll die nachfolgend aufgeführten Anforderungen erfüllen:

- **Daten und Metadaten**  
Das Archivierungssystem muss die Möglichkeit bieten, die Basisdaten und die zugehörigen Metadaten gleichermaßen in einer Datenbank zu verwalten.
- **Identifikation und Zugriff**  
Es muss sicherstellen, dass der logische Zusammenhang der Basisdaten erhalten bleibt und die entsprechenden Metadaten zugeordnet werden. Auch beim Zugriff auf ein einzelnes Datum (Messpunkt) muss gewährleistet sein, dass die begleitenden Informationen (z.B. Aufnahmezeitpunkt) nicht verloren gehen.
- **Strukturierung**  
Das System soll die Möglichkeit der (räumlichen und zeitlichen) Strukturierung der enthaltenen Datensätze bieten. Den im Nachlauf angewendeten Methoden soll der effiziente Zugriff auch auf umfangreiche Datenbestände gewährt werden.
- **Protokollierung**  
Alle Modifikationen der Basisdaten müssen protokollierbar und damit umkehrbar sein. Der Urzustand der importierten Datensätze muss jederzeit wiederhergestellt werden können (reversibles Datenmodell). Es sollte möglich sein, auch zu einem späteren Zeitpunkt andere, dem aktuellen Kenntnisstand entsprechende Methoden auf das Archiv anwenden zu können.

Die Recherche nach solch einem System ergab, dass zum gewünschten Zeitpunkt keine geeignete und zudem kostenfreie Lösung verfügbar war. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen der Projektarbeit ein entsprechendes System prototypisch entwickelt und implementiert.

Die Implementierung der Projektdatenbank basiert auf einem relationalen Datenbankmanagementsystem. Für einige Datenbanksysteme existierten zum Zeitpunkt der Umsetzung bereits Erweiterungen zur Speicherung speziell georeferenzierter Sachdaten. Es hat sich jedoch in der Erprobung gezeigt, dass diese zum damaligen Zeitpunkt nicht standardisierten Erweiterungen vor allem für die Verwendung im Zusammenhang mit einem Geo-Informationssystem (GIS) ausgelegt sind. Dementsprechend unterstützen diese Erweiterungen vorwiegend die Speicherung und Suche nach den geometrischen Objekten "Fläche" und "Linie". Die bei der Aufgabenstellung vorliegenden Datenbestände bestehen jedoch aus einer großen Anzahl von Informationen, die an Punkten vorliegen. Untersuchungen haben gezeigt, dass die genannten Erweiterungen bei der Verwaltung von umfangreichen Vermessungsdaten zu keiner Steigerung der Performanz führen. Darüber hinaus war es möglich, durch die Bündelung von Messdaten

zu Basisdatensätzen und die Verwendung von Metainformationen eine flache und einfache aber leistungsfähige Datenbankstruktur auf der Basis standardisierter Datentypen zu entwickeln.

Die Umsetzung der Datenbankstruktur orientiert sich an Standards und kann in jeder SQL-fähigen Umgebung angewendet werden. Bei der Umsetzung fiel die Wahl zugunsten des frei verfügbaren Datenbankmanagementsystems MySQL. Als Datenbankserver kam eine Workstation mit 900 MHz und 1 GB Arbeitsspeicher unter dem Betriebssystem Solaris 8 zum Einsatz. Die genannte Hardware dient neben ihrer Funktion als Datenbankserver auch als Webserver für die projektbegleitende Dokumentation.

Die Entwicklung der Datenbankstruktur wurde auf der Basis des Entity-Relationship-Modell (ERM) durchgeführt. Mit Hilfe des ERMs kann sowohl die Struktur des reversiblen Datenmodells als auch die Abhängigkeit der Daten untereinander beschrieben werden.

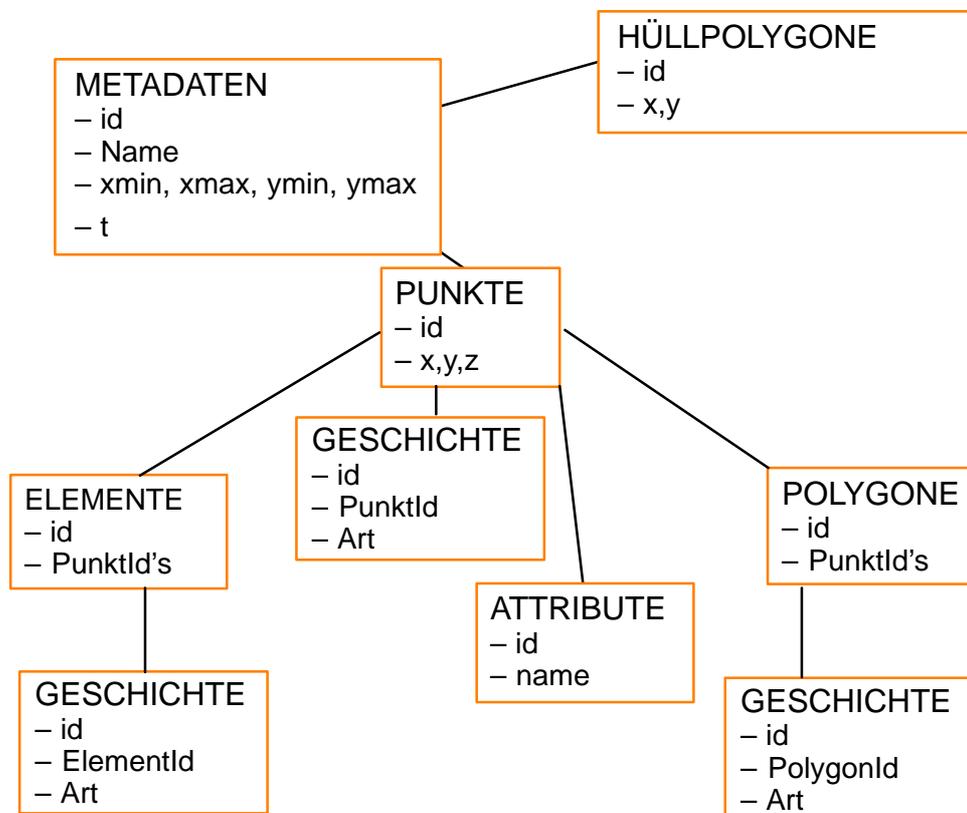


Abbildung 2-7 Datenbankkonzept des reversiblen Datenbankmodells

In Abbildung 2-7 ist das für die Datenbank zugrunde gelegte ER-Modell und die Tabellenstruktur schematisch dargestellt. Es besteht aus den Entitäten Daten, Metadaten, Aussagebereich und Daten-Geschichte, die jeweils über Beziehungen miteinander verbunden werden.

Bei der Auswahl der Datenbank wie auch in anderen Bereichen des Projektes wurde konsequent auf die Verwendung von Open-Source-Produkten geachtet. So wurden verschiedene relationale Datenbanksysteme für den praktischen Einsatz untersucht. Die Wahl viel auf die weitverbreitete

Open-Source-Datenbank MySQL®. MySQL® besitzt den Anspruch eines schnellen, sicheren und zuverlässigen Datenbanksystems. Der Nachteil dieses Systems ist ein geringerer Funktionsumfang als bei anderen Datenbanksystemen. Da für das Forschungsprojekt eine sehr einfache Struktur gewählt wurde, sind die bestehenden Methoden von MySQL® vollkommen ausreichend. Weiterhin unterliegt das Datenbanksystem einer ständigen Weiterentwicklung, die auch eine Erweiterung der Funktionalität vorsieht. Durch die Erweiterung der Funktionalität besteht zu einem späteren Zeitpunkt die Möglichkeit die Methoden zu optimieren. Dieser Performanzgewinn ist vor allem für eine spätere Nachnutzung der entwickelten Verfahren von großer Bedeutung.

Für den Import der Daten und Metadaten in die Datenbank wurden verschiedene Applikationen implementiert. Als Programmiersprache wurde, wie auch bei allen anderen Methoden, die Programmiersprache Java verwendet. Die Datenbank MySQL® stellt neben der eigentlichen Datenbank auch Schnittstellen zu Programmiersprachen, u.a. Java, bereit, so dass ein einfacher und reibungsloser Ablauf für den Import der Metadaten geschaffen werden konnte.

In der Applikation wurden neben dem eigentlichen Import der Daten und vorhandenen Metadaten auch gleichzeitig die Generierung der zusätzlichen bzw. noch nicht vorhandenen Metadaten implementiert. Hierzu gehört insbesondere der Aussagebereich der Messungen.

Für die Protokollierung wurden die erforderlichen Strukturen angelegt. Jede Messung erhält eine eigene Geschichtstabelle (History-Tabelle).

KoDiBa / _tp_bsh_1989_skn_dat_data_points_history: 19 Records (19 retrieved)						
historyid	ts	user	type	pointid	old_x	old_y
1	1055753892297	root	MODIFY	4424	2556671,95763246	5949657,391286
2	1055753892988	root	MODIFY	4426	2557205,72717409	5948650,5078326
3	1055753893759	root	MODIFY	7085	2557533,26757464	5949608,8667826
4	1055753894450	root	MODIFY	7038	2558091,29936816	5948917,3926036
5	1055753896884	root	MODIFY	6238	2555422,45166001	5949305,5886336
6	1055753899117	root	INSERT	24452	2555034,25562973	5948080,344916
7	1055753899598	root	INSERT	24453	2556235,2370984	5949050,8349886
8	1055753899978	root	INSERT	24454	2556647,69538057	5946879,3634446
9	1055753900499	root	INSERT	24455	2556174,58146867	5947764,935636
10	1055753901000	root	INSERT	24456	2555240,48477082	5946260,6760216
11	1055753901410	root	INSERT	24457	2557969,9881087	5946806,5766886
12	1055753902782	root	DELETE	24457	2556406	595136
13	1055753903473	root	DELETE	24456	2554197	595216
14	1055753909312	root	MODIFY	6293	2554205	595266

Abbildung 2-8 Geschichtstabelle (HISTORY-Tabelle)

Die Abbildung 2-8 zeigt ein Beispiel für eine Geschichtstabelle. Neben einer allgemeinen Id (historyid) wird der Zeitpunkt (ts) und die Art der Veränderung (type) protokolliert. Danach folgt dann die Punktnummer (pointid), sowie die vorherigen Werte (old\_x, old\_y). Durch die Dokumentation der zeitlichen Abfolge kann jederzeit die gesamte Bearbeitung nachvollzogen und einzelne oder alle Schritte rückgängig gemacht werden. Daher ist es jederzeit möglich andere Bearbeitungsstrategien anzuwenden, ohne dass die Ursprungsinformationen der Punktmenge verloren gehen.

Die Qualität der abgeleiteten Geländemodelle hängt wesentlich von der Güte der verwendeten Basisdaten (Vermessungsdaten) und deren zugehörigen Metadaten ab. Die zur Verfügung stehenden Datensätze können nur verwendet werden, wenn diese widerspruchs- und redundanzfrei sind. Solche Daten werden konsistent genannt. Zusätzlich muss gefordert werden, dass auch die Daten und zugehörigen Metadaten zueinander passen und alle relevanten Informationen beinhalten. Dies wird im Weiteren als Metadatenkonsistenz bezeichnet.

Obwohl die aufnehmenden Stellen eine Plausibilisierung der Daten durchführen, sind immer wieder redundante, widersprüchliche oder fehlerhafte Informationen in den Daten und Metadaten zu finden. Als Ursache hierfür lassen sich häufig Unzulänglichkeiten im durchgeführten Datenprocessing identifizieren. Aber auch die ständige und teilweise divergierenden Entwicklungen der Mess- und Archivierungstechnik sowie die unterschiedlichen Aufgabenfelder der datenerhebenden Dienststellen und damit in Zusammenhang stehende unterschiedliche Schwerpunkte, sind Quellen möglicher Inkonsistenzen in den Daten und zugehörigen Metadaten.

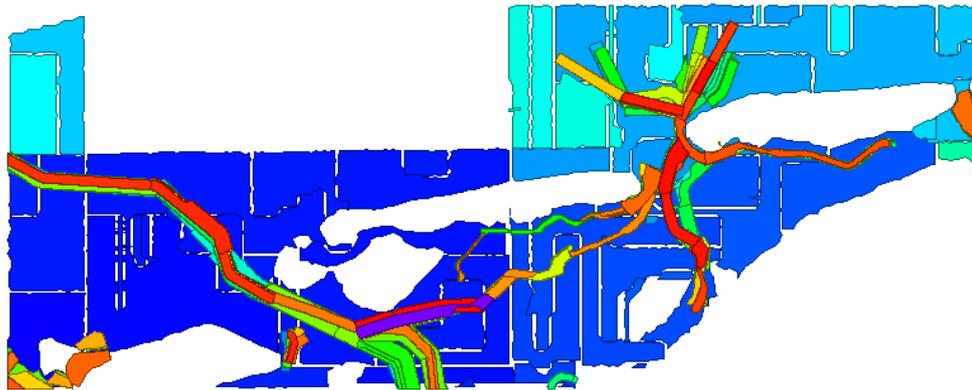
Um die Konsistenz der Daten sicherzustellen, sind verschiedene Verifikationsmethoden entwickelt und angewendet worden. Neben der Verifikation der Daten und Metadaten ermöglicht eine Fehleranalyse eine weitergehende Beurteilung der Güte der Vermessungsdaten. Die Konsistenz der verifizierten Basisdaten und Metadaten ist Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit der entwickelten Methoden zur Bathymetriesimulation. Würden die Verfahren auf Daten angewendet werden, die keine Fehleranalyse durchlaufen haben, so würde dies auch zu Ergebnissen führen. Es könnte jedoch nicht sichergestellt werden, dass die Bathymetriesimulationen keine akkumulierten Fehler enthalten. Diese zuletzt genannten Fehler wären zudem nicht näher spezifizierbar.

### 3.1 Bestimmung der Aussagebereiche

Vermessungsdaten beinhalten punktuelle Informationen über die Tiefe an einem Ort zum Vermessungszeitpunkt. Vermessungen werden mit dem Ziel durchgeführt, flächenhafte Informationen über den Meeresgrund zu erhalten. Die Übertragung dieser punktförmigen Informationen in ein flächenhaftes Modell des Bodens erfolgt mittels Interpolations- und Approximationsverfahren. Solche Verfahren erlauben es in der Regel nur in der Umgebung von gemessenen Punkten auf die Geländeoberfläche zu schließen. Die Festlegung dieser Umgebung, für welche die gemessenen Datenpunkte repräsentativ sind, wird als räumlicher Aussagebereich bezeichnet. Werden nicht nur Vermessungsdaten, die zu einem Zeitpunkt aufgenommen wurden, betrachtet sondern Vermessungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten, so muss der Begriff des Aussagebereichs auf die Zeit ausgedehnt werden.

#### 3.1.1 Räumlicher Aussagebereich

Der räumliche Aussagebereich ist abhängig von der verwendeten Interpretationsvorschrift und den örtlichen Gegebenheiten. Für endliche Mengen von Vermessungsdaten lässt sich der Gültigkeitsbereich durch deren Hüllen beschreiben. Solche Hüllen lassen sich in konvexe und nicht-konvexe Hüllen unterscheiden.



**Abbildung 3-1** Räumliche Aussagebereiche der Projektdaten

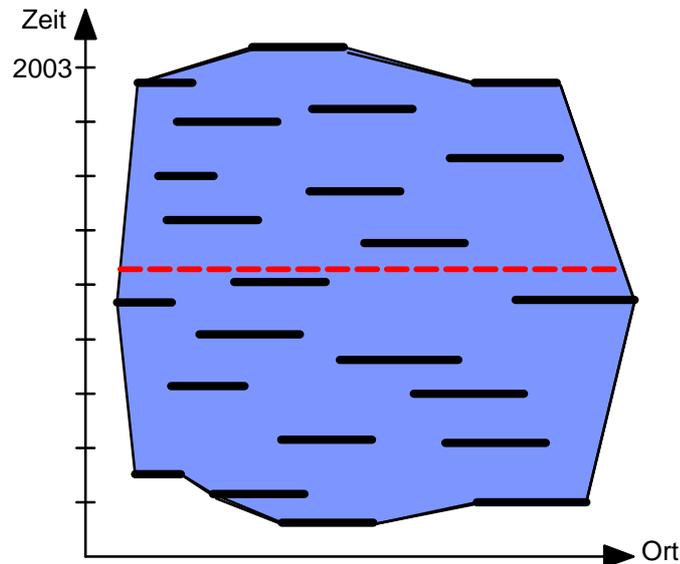
Die konvexe Hüllen einer Punktmenge ist die kleinste konvexe Menge die alle Vermessungspunkte enthält. Die konvexe Hülle einer Menge wird unter Beachtung aller Nachbarschaften der Punkte gebildet. Die Verteilung der Vermessungspunkte kann aber unter Umständen sehr unterschiedlich sein. Die Berücksichtigung dieser lokalen Abstände führt zur Definition nicht konvexer Hüllen. Zur Konstruktion nicht-konvexer Hüllen haben sich Alpha-Formen als geeignete Herangehensweise herausgestellt [EKS83 und AbM91].

#### 3.1.2 Zeitlicher Aussagebereich

Werden nicht nur Vermessungsdaten einer Messkampagne betrachtet sondern zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommene Daten, so muss die Zeit in die Bestimmung des Aussagebereiches einbezogen werden. Die

Strukturierung der Vermessungsdaten in Messkampagnen, die mit tagesgenauen Zeitangaben versehen werden, ermöglichen die Bestimmung von örtlich–zeitlichen Aussagebereichen. Auch diese sind wieder Abhängig von den örtlichen Gegebenheiten und den verwendeten Interpolationsmethoden aber auch von den Veränderungen der Bathymetrie.

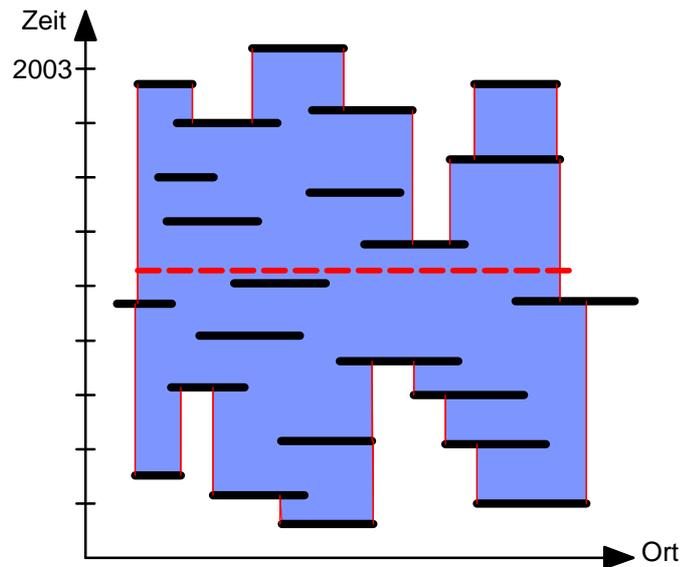
Die rein geometrischen Verfahren zur Bestimmung der konvexen und nicht-konvexen Hülle lassen sich auf die Vermessungspunkte im Orts–Zeit–Raum übertragen.



**Abbildung 3-2** konvexe Raum–Zeit–Hüllen

Die in Abbildung 3-2 skizzierte konvexe Hülle in Raum und Zeit aller zur Verfügung stehenden Vermessungsdaten ist ein Beispiel eines Aussagebereiches, wie er bei den im Abschnitt 4.3 beschriebenen Interpolationsverfahren mit direkter Kopplung von Raum und Zeit, verwendet wird.

Werden jedoch zunächst die etwas einfacheren Interpolationsverfahren mit Trennung von Raum und Zeit betrachtet (siehe Abschnitt 4.2), so ergeben sich Aussagebereiche auf der Basis einfacher Betrachtungen von Zeitstrahlen.



**Abbildung 3-3** Örtlich-zeitlicher Aussagebereich auf der Grundlage von Zeitstrahlen

Wie auch bei den örtlichen Aussagebereichen müssen bei den Orts-Zeit-Aussagebereichen örtliche Gegebenheiten, die Häufigkeit der Vermessungen als auch die verwendeten Messverfahren berücksichtigt werden.

## 3.2 Verifikation

Unter der Verifikation der Messdaten und zugehörigen Metadaten wird die Überprüfung auf unplausible Werte und Informationen verstanden. Dabei werden nur die reinen Messpunkte ohne eine weitere Verarbeitung, wie beispielsweise in Form einer Triangulation der Punkte, herangezogen. Unter den Begriff der Verifikation fallen somit die Konsistenzprüfung der Metadaten und Untersuchungen auf identische und lagegleiche Punkte in den Vermessungsdaten.

### 3.2.1 Metadatenkonsistenz

Metadaten als datenbeschreibende Informationen können zunächst auf ihre syntaktische Korrektheit geprüft werden. Automatische Tests der Syntax lassen sich bei standardisierten Metadatenformaten realisieren.

Die inhaltliche Prüfung der Metadaten setzt eine Vielzahl von Hintergrundinformationen voraus und kann derzeit nur manuell geprüft werden. Die Konsistenz der im Projekt KoDiBa erstellten zusätzlichen Metainformationen, wie die Aussagebereiche in Form von konvexen und nicht-konvexen Hüllen, in Bezug zu den eigentlichen Vermessungsdaten ist implizit gegeben.

### 3.2.2 Identische Punkte

Als identische Punkte werden Punkte bezeichnet, die innerhalb einer Messung mehrfach vorkommen. Bei ihnen sind die Lagekoordinaten

(x, y-Koordinate) sowie der gemessene Höhenwert (z-Koordinate) gleich. Identische Punkte können bei der späteren Anwendung von Methoden, wie beispielsweise der Triangulation zu Fehlinterpretationen führen.

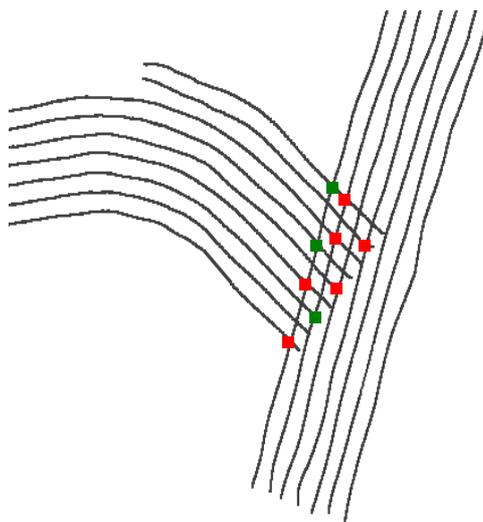
Da bei identischen Punkten alle drei Koordinaten exakt gleich sind, werden zum Erreichen eines konsistenten Zustandes sämtliche identische Punkte ermittelt und alle bis auf einen als gelöscht markiert. In der HISTORY-Datei wird festgehalten, wie viele und welche Punkte als gelöscht markiert wurden. Die HISTORY-Datei kann als Grundlage für weitergehende Analysen herangezogen werden.

Als eine mögliche Quelle für das Auftreten von identischen Punkten können Unzulänglichkeiten im Datenprocessing bzw. Rundungsfehler bei der Archivierung genannt werden.

### 3.2.3 Lagegleiche Punkte

Lagegleiche Punkte besitzen die gleichen Lagekoordinaten (x, y-Koordinate), aber unterschiedliche Höhenwerte (z-Koordinate). Da diese Messpunkte innerhalb einer Messung vorliegen und damit zum selben Zeitpunkt aufgenommen wurden, existieren für eine Messposition widersprüchliche Höheninformationen. Aufgrund des Widerspruchs kann keine eindeutige Bearbeitungsstrategie für die Behandlung der lagegleichen Punkte entwickelt werden. Vielmehr muss der Bearbeiter festlegen, wie mit diesen Punkten zu verfahren ist.

Dem Bearbeiter stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung wobei allen gemein ist, dass die widersprüchlichen Punkte durch einen einzigen Punkt ersetzt werden (im Sinne des reversiblen Datenmodells). Den Wert dieses Punktes muss der Bearbeiter festlegen. Mögliche Werte hierfür sind das Maximum, das Minimum, der Mittelwert oder der Median der Höhenwerte. Ein weiteres denkbare Kriterium zur Ermittlung eines neuen Höhenwertes wäre ein Vergleich des Höhenwertes mit den Höhenwerten der Punkte in seiner Umgebung.



**Abbildung 3-4** Identische (rot) und lagegleiche (grün) Punkte

In Abbildung 3-4 sind identische und lagegleiche Punkte dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass in diesem Beispiel beide Phänomene ihre Ursache in der Überschneidung von Peillinien haben.

Die Erweiterung der genannten Untersuchungen auf nahezu lagegleiche Punkte gibt zusätzliche Hinweise auf möglicherweise fehlerbehaftete Daten. Die Wahl des Abstandes, den zwei Datenpunkte nicht unterschreiten dürfen muss auf der Grundlage der Verteilung der minimalen Punktabstände in den Daten erfolgen.

## 3.3 Fehleranalyse

Neben der Verifikation der Vermessungsdaten ist auch die Analyse auf mögliche Fehler eine wichtige Voraussetzung für die Erstellung konsistenter digitaler Geländemodelle. Als Fehler wird die Abweichung des gemessenen Wertes zum tatsächlichen Wert bezeichnet. Die Problematik dieser Aussage liegt darin, dass für die Identifikation eines Fehlers der tatsächliche Wert bekannt sein müsste. Dies könnte höchstens durch Kontrollmessungen erreicht werden, wobei auch hier untersucht werden muss, ob die Kontrollmessung fehlerbehaftet ist.

Deshalb ist es im Allgemeinen nicht möglich, von einem definitiven Fehler zu sprechen. So können Fehler immer nur anhand von Kriterien bestimmt werden. Aus diesem Grund wurde ein Konzept für die Fehleranalyse entwickelt, welches auf der Verwendung von einzelnen Indikatoren beruht.

Für die Indikatoren selbst werden im Allgemeinen die Punkte mit den benachbarten Punkten in Beziehung gesetzt und bestimmte Eigenschaften der Geländeoberfläche angenommen.

Im Folgenden soll das Konzept sowie einige Indikatoren genauer beschrieben werden.

### 3.3.1 Konzept

Die Tatsache, dass die wahren Tiefenwerte an den Messpositionen nicht bekannt sind, führt dazu, dass nur Indikatoren für möglicherweise fehlerhafte Daten angegeben werden können. Weisen mehrere Indikatoren auf einen Fehler so erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass es sich wirklich um eine fehlerhafte Messung handelt. Werden diese Fehlerindikatoren in eigenständigen Layern gespeichert so können diese in einem zweiten Schritt gewichtet und ausgewertet werden.

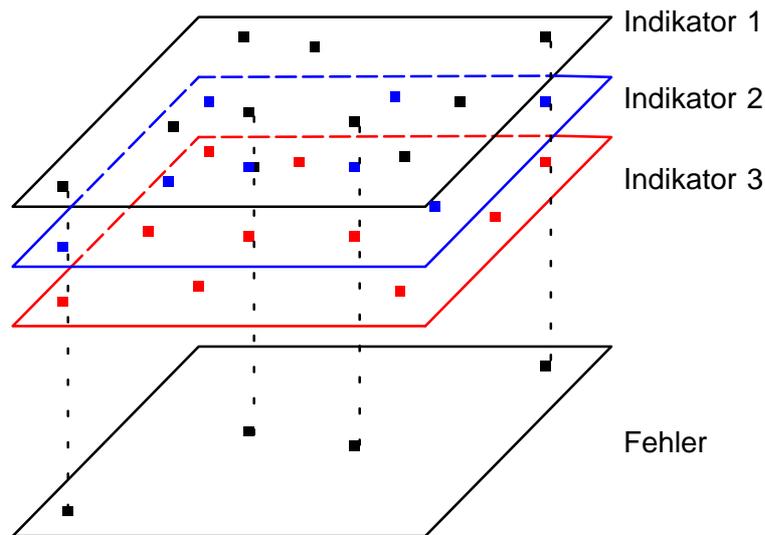


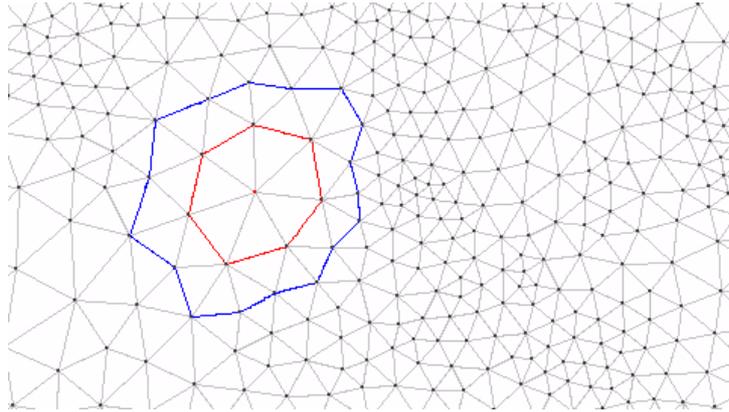
Abbildung 3-5 Modell des Fehlerkonzeptes

In der Abbildung 3-5 wird durch ein farbliches markieren der fehlerhaften Daten das Prinzip des verwendeten Fehlerkonzeptes dargestellt. Jeder Fehlerindikator markiert in der Punktmenge verschiedene Punkte und kennzeichnet deren Vertrauenswürdigkeit. Als Kombination kann beispielsweise der Durchschnitt aus den Indikatoren verwendet werden. Das bedeutet, dass ein Fehler durch alle drei Indikatoren erkannt werden muss, damit er als Fehler markiert wird. Es können aber auch andere Kombinationen wie z.B. die Vereinigung der Indikatoren verwendet werden. Durch eine reellwertige Festlegung des Erfülltseins der Bedingung des Fehlerindikators ist eine weitere Differenzierung möglich.

Die Art und Weise einer späteren Fehlerkorrektur wird in Anlehnung an die Fehlerindikatoren und im Rahmen des reversiblen Datenmodells festgelegt.

Der sandige Charakter der in KoDiBa betrachteten Küstenbereiche legt es nahe, im weiteren Verlauf für die Geländeoberfläche stetig und nur mäßige Variationen im Ort anzunehmen. Der Begriff der Umgebung, speziell der Umgebung eines Punktes, wird im Weiteren eine zentrale Rolle spielen und ist wie folgt definiert.

**Umgebung eines Punktes:** Unter der Umgebung eines Punktes wird die Menge aller Punkte verstanden, die innerhalb eines bestimmten Radius zum betrachten Punkt liegen. Werden diskrete Punktmengen betrachtet, wie dies bei Vermessungsdaten der Fall ist, so kann die Umgebung bezüglich der benachbarten Punkte definiert werden. Dabei werden für jeden Punkt Nachbarschaftsrelationen festgelegt. Dies erfolgt im Allgemeinen auf der Basis einer Voronoi-Zerlegung und der dualen Struktur, der Delaunay-Triangulation. Die dabei entstehende Delaunay-Zerlegung hängt nur von der Lage der einzelnen Punkte ab. Als Umgebung können dann alle die Punkte definiert werden, die über eine bestimmte Anzahl von Kanten erreicht werden können.



**Abbildung 3-6** Beispiel für eine Nachbarschaftsumgebung auf der Basis der Delaunay–Triangulation

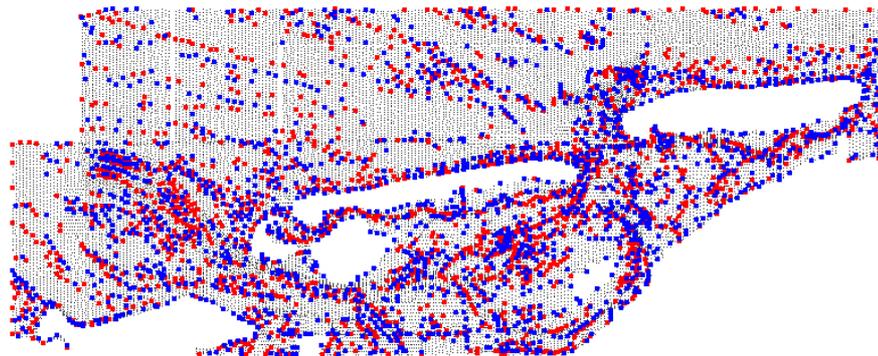
In Abbildung 3-6 ist eine Delaunay-Triangulation dargestellt. Ausgehend von einem Punkt (rot) werden zunächst die direkten Nachbarpunkte (ebenfalls rot) und danach die übernächsten Nachbarn ermittelt (blau dargestellt). Die Definition einer “Nachbarschaft n-ter Ordnung” erfolgt dann über die Anzahl der Nachbarschaften, dem diskreten Radius.

### 3.3.2 Fehlerindikatoren

Nach der allgemeinen Beschreibung des Fehlerkonzeptes und der Definition der Umgebung werden im Folgenden einige Fehlerindikatoren vorgestellt.

**Lokale Extrema:** Innerhalb der definierten Umgebung wird untersucht, ob der Punkt den größten oder kleinsten gemessenen Wert besitzt. Lokale Ausreißer sind im Allgemeinen auch lokale Extrema.

Da es sich bei dieser Methode um eine lokale Untersuchung handelt, hängt das Ergebnis von den Definition der Umgebung ab. Werden beispielsweise nur die nächsten Nachbarn herangezogen, so werden wesentlich mehr Extrema gefunden, als wenn die Nachbarn 2. oder 3. Ordnung Berücksichtigung finden.



**Abbildung 3-7** Darstellung der lokalen Minima (rot) und Maxima (blau) 1. Ordnung für das Jahr 1992

**Lokale Abweichung:** Die lokale Abweichung vergleicht den tatsächlichen Messwert mit einem Wert, der aus den Messwerten in seiner Umgebung

errechnet wird. Dabei gibt es verschiedene Ansätze den Wert zu errechnen. Hierzu gehört die Wertermittlung aus dem Mittelwert oder Median. Werden Annahmen über die räumliche Interpolation getroffen, so können für die untersuchte Stelle auch interpolierte Werte herangezogen werden. Der Unterschied zwischen dem tatsächlichen und errechneten Wert wird über die Differenz bestimmt. Übersteigt die Differenz einen zuvor definierten Schwellenwert, so wird der Punkt als fehlerhaft markiert.



**Abbildung 3-8** Darstellung der Abweichungen

Die Abbildung 3-8 zeigt beispielsweise die Punkte eingefärbt nach der Größe ihrer Abweichungen. Es ist deutlich zu erkennen, dass in vielen Gebieten die lokale Abweichung sehr gering ist. Allerdings sind auch einige Punkte zu erkennen, bei denen die Abweichung zur Umgebung sehr hoch ist. Diese Punkte können durch den beschriebenen Fehlerindikator als fehlerhaft markiert werden. Bei Kenntnis der Bathymetrie des Projektgebietes ist in der Abbildung 3–8 zu erkennen, dass große absolute Differenzen in der Nähe steiler Rinnenkanten auftreten. Die Berücksichtigung der in den Vermessungsdaten enthaltenen Tiefengradienten führt zu einer wesentlichen Verbesserung dieses Fehlerindikators.

**Statistik:** Durch statistische Betrachtungen der Messwerte einer Umgebung können weitere Fehlerindikatoren entwickelt werden. Neben dem Mittelwert oder Median können auch die Standardabweichung und die Varianz der Umgebung bestimmt werden und zur Beurteilung der Korrektheit der Daten herangezogen werden. Fällt der Punkt beispielsweise aus dem Bereich der Standardabweichung heraus, so wird er als potentiell fehlerhaft markiert.

**Ausgleichsflächen:** Eine sehr weit verbreitete Methode ist die Anwendung von Ausgleichsflächen. Die Punktemenge dient dabei als Grundlage für polynomiale Ausgleichsflächen. Ist eine Ausgleichsfläche definiert, so wird die Abweichung der Punkte zur Ausgleichsfläche bestimmt. Übersteigt die Abweichung einen vorher definierten Wert, so wird der Punkt als fehlerhaft markiert.

Durch die Verwendung der Fehlerindikatoren und deren Kombination konnten Unstimmigkeiten in den Vermessungen aufgedeckt werden. Die einzelnen Punkte mussten dann manuell bearbeitet werden. So wurden entweder die Messwerte auf sinnvolle Werte angepasst oder die Punkte als gelöscht markiert. Bei der Bearbeitung der Punkte wurden die Bearbeitungsschritte in der Geschichtstabelle (HISTORY) gespeichert. Hierdurch können zu einem späteren Zeitpunkt die durchgeführten Bearbeitungen nachvollzo-

gen und wenn nötig jederzeit rückgängig gemacht werden, um beispielsweise andere Fehlermethoden anwenden zu können.

### 3.4 Strukturerkennung

Die Vermessung des Seebodens erfolgt mit unterschiedlichen Verfahren, die sich in einer stetigen Weiterentwicklung befinden. Sowohl das Verfahren als auch die örtliche Dichte der Vermessungsdaten wird so gewählt, dass diese die Geländeoberfläche mit ausreichender Genauigkeit repräsentieren. Die Kenntnis der Struktur der Vermessungsdaten als auch die bei der Messung vorhandenen Rahmenbedingungen ermöglichen eine qualitative Einordnung der Vermessungsdaten.

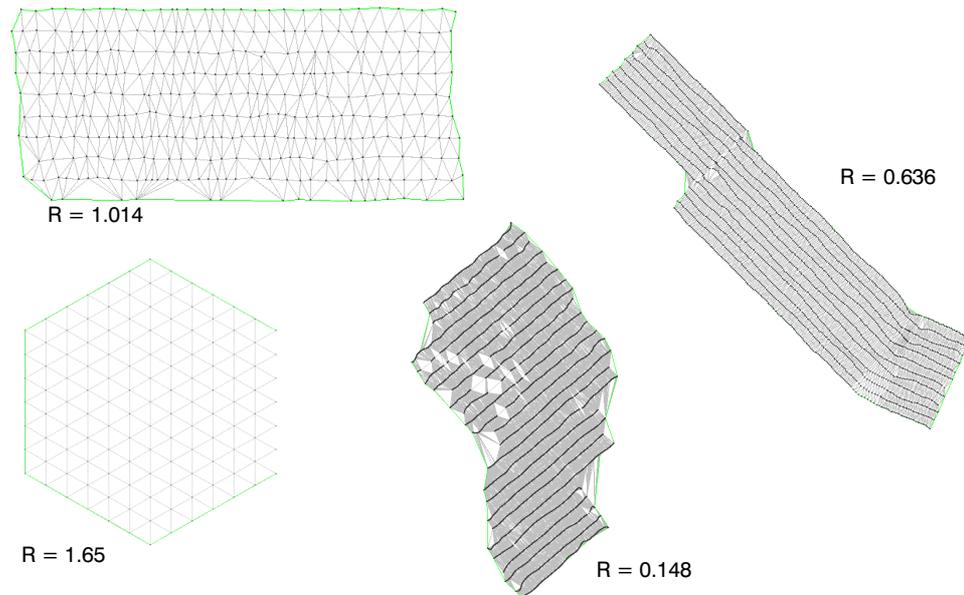
Die Kenntnis ausgezeichneter Strukturen der Geländeoberfläche unterstützt die Beurteilung der Korrektheit der Vermessungsdaten und führt zu einer höheren Qualität der abgeleiteten digitalen Bathymetrien. Nur in den seltensten Fällen, werden solche Strukturinformationen während der Vermessung mit aufgenommen und adäquat dokumentiert. Für die digitale Geländemodellierung ist die Kenntnis von Kamm- und Tallinien als auch die Lage und Geometrie von Bauwerken von essentieller Bedeutung.

#### 3.4.1 Räumliche Struktur von Vermessungsdaten

Die Stützwerte der durchgeführten Vermessungen sollen die Geländeoberfläche möglichst gut repräsentieren. An Stellen mit großen Veränderungsraten sollte eine höhere Dichte der Stützpunkte angestrebt werden. Die Analyse der Dichte oder Verteilung der Punkte kann Hinweise auf die Vertrauenswürdigkeit einer Punktmenge für Interpolationsaufgaben geben. Ein einfaches Verfahren zur Beurteilung der generellen Verteilung der Punkte basiert auf der Analyse der nächsten Nachbarn, der Bestimmung der Yeates-Dichte einer Punktmenge. Dabei wird ein globales Maß für die Verteilung der Punkte in der Ebene bestimmt. Das Verteilungsmaß kann wie folgt berechnet werden:

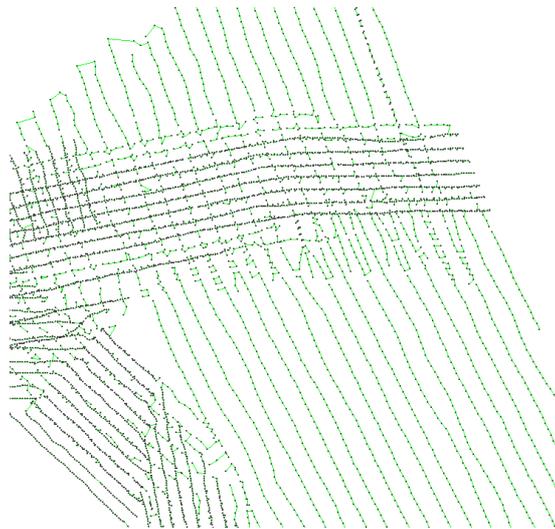
$$R := \sum_{i=1}^n d_i * 2 * \frac{\sqrt{n/A}}{n}$$

Der Parameter  $d_i$  beschreibt den Abstand jedes Punktes zum nächsten Nachbarn,  $n$  die Anzahl der Punkte und  $A$  die Fläche des gesamten Aussagebereiches (der konvexen oder nicht-konvexen Hülle) ist. Die Kennzahl  $R$  kann Werte von 0 bis etwa 1,7 annehmen. Hierbei bedeutet der Wert 0, dass alle Punkte die gleichen Koordinaten haben. Ein wachsendes  $R$  bedeutet, dass die Punkte immer gleichmäßiger verteilt sind.



**Abbildung 3-9** Beispiele für Punktmengen mit verschiedenen Verteilungen

Das Aufnahmeverfahren selbst kann zu einer zusätzlichen Strukturierung der Daten führen. So liegen bei Linienpeilungen die Punkte in einer ausgezeichneten Reihenfolge vor. Diese Information kann vorteilhaft bei der Erzeugung flächenhafter Informationen herangezogen werden und führt somit zu einer Verbesserung der Interpolation.



**Abbildung 3-10** Strukturerkennung bei Linienpeilungen

Wie in Abbildung 3-10 deutlich zu erkennen ist, wurden die Punkte nach einem bestimmten Schema gepeilt. Aus der Lage der Punkte können die gefahrenen Peillinien abgelesen werden. Für die Interpolation auf der Basis dieser Vermessungspunkte kann diese Information zu einer wesentlichen Verbesserung führen.

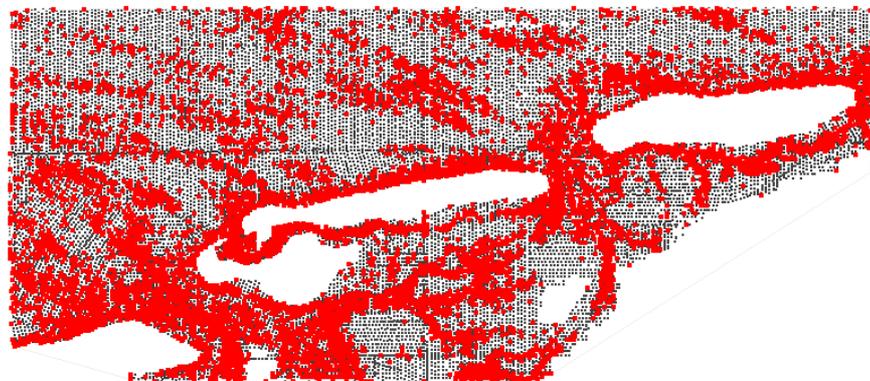
Beispielsweise kann bei der Triangulation von Linienpeilungen darauf geachtet werden, dass die Punkte eines Elementes nicht alle auf einer Linie liegen. Würden alle Punkte auf eine Linie liegen, so gäbe es in einigen

Bereichen stark deformierte Dreiecke. Bei einer Interpolation kann dies zu einer nicht korrekten Abbildung der Geländeoberfläche im digitalen Modell führen.

### 3.4.2 Bathymetrische Strukturen

Interpolations- und Approximationsverfahren, die es erlauben, ausgehend von Punktmessungen auf den Verlauf der Geländeoberfläche zu schließen, gehen von empirischen und normativen Annahmen über die Gestalt der Geländeoberfläche aus. Ausgezeichnete Strukturen wie Kammlinien und Bruchkanten stellen im Allgemeinen Ausnahmen von den globalen Annahmen der Geländeoberfläche dar. Die Berücksichtigung dieser Strukturen in den eingesetzten Interpolationsmethoden führt in der Regel zu einer verbesserten Abbildung der Geländeoberfläche. Werden solche Strukturen nicht explizit aufgenommen und protokolliert, kann versucht werden, diese auf der Basis der Vermessungsdaten zu identifizieren.

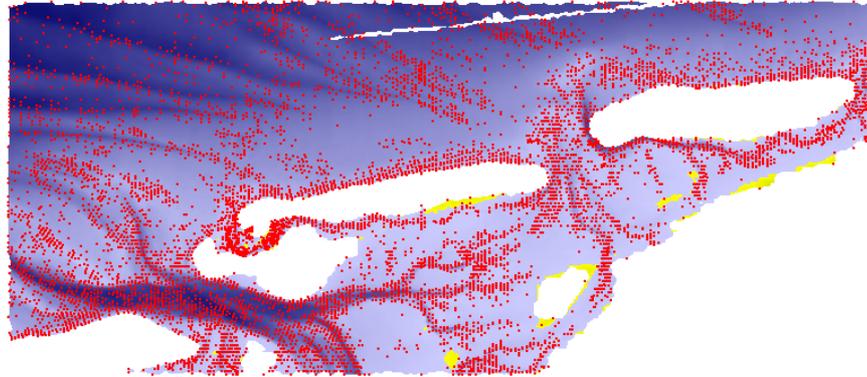
Ein erster Ansatz ist die Vergrößerung der Punktmenge. Für die Vergrößerung muss ein Interpolationsverfahren und ein zulässiger Fehler gewählt werden. Das Interpolationsverfahren soll nach der Vergrößerung das Gelände bis auf den maximal zulässigen Fehler exakt beschreiben. Begonnen wird mit einer Ausgangszerlegung, die die Berandung des Gebietes beschreibt. Ausgehend von der Berandung wird nacheinander der Punkt mit dem jeweilig größten Fehler eingefügt. Dadurch verringert sich der maximale Fehler stetig. Der Algorithmus bricht ab, wenn der Fehler aller verbliebenen Punkte kleiner als der gewählte zulässige Fehler ist. Das Ergebnis ist eine Triangulation mit weniger Punkten als die Ausgangsmenge.



**Abbildung 3-11** Vergrößerte Punktmenge

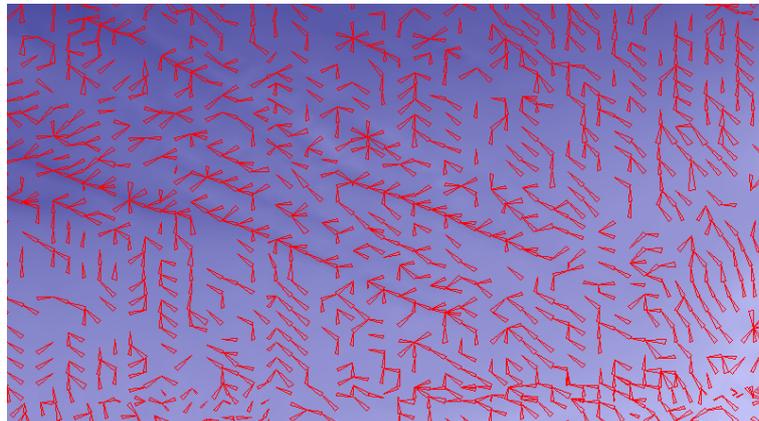
Abbildung 3-11 zeigt die vergrößerte Punktmenge (rot dargestellt) und die Ausgangspunktmenge (schwarz). Die Vergrößerung in diesem Beispiel wurde mit einem maximal zulässigem Fehler von 0,05 m durchgeführt. Als Interpolationsmethode wurde die zweidimensionale lineare Interpolation verwendet. Es ist deutlich zu erkennen, dass in bestimmten Bereichen nur noch sehr wenig Punkte vorhanden sind. Solche Bereiche sind durch ihre Ebenheit gekennzeichnet. Ebene Geländeverläufe können sehr leicht durch die lineare Flächen beschrieben werden. Interessanter sind allerdings die Bereiche, wo Punkthäufungen auftreten. Hier kann davon ausgegangen werden, dass die Struktur des Geländes sich stark ändert. Diese Phänomene tritt vor allem bei Geländekanten, wie z.B. Kamm- oder Tallinien, auf.

Dass diese Punkthäufungen wirklich im Bereich von starken Geländeänderungen liegen, zeigt die Abbildung 3-12. Durch die farbliche Codierung der Höhenwerte in der Originalmenge können visuell sehr leicht Strukturen erkannt werden. Punkthäufungen der vergrößerten Punktmenge (rot) treten vor allem in den Bereichen mit Strukturen auf.



**Abbildung 3-12** Vergrößerte Punktmenge im Vergleich zur farblich Originalmenge

Eine weitere Möglichkeit Strukturen in Geländemodellen zu ermitteln, ist die Nutzung von Abflussbäumen. Anschaulich kann der Abflussbaum durch den Weg eines Wassertropfens beschrieben werden. Ein Wassertropfen fließt von Punkt  $x$  immer den Weg mit den steilsten Gradienten zu einem Punkt  $y$ . Ein Abflussbaum ist nun die Summe aller angrenzenden Flüsse. Um einen Abflussbaum verwenden zu können, ist die Definition von Nachbarschaften wichtig. Innerhalb der nächsten Nachbarschaft von einem Punkt wird der Punkt mit dem größten Gradienten gesucht. Als Modellvorstellung dient dabei, dass ein Wassertropfen zu diesem Punkt fließen würde. Das Verbinden aller angrenzenden Flüsse führt zu Abflussbäumen.



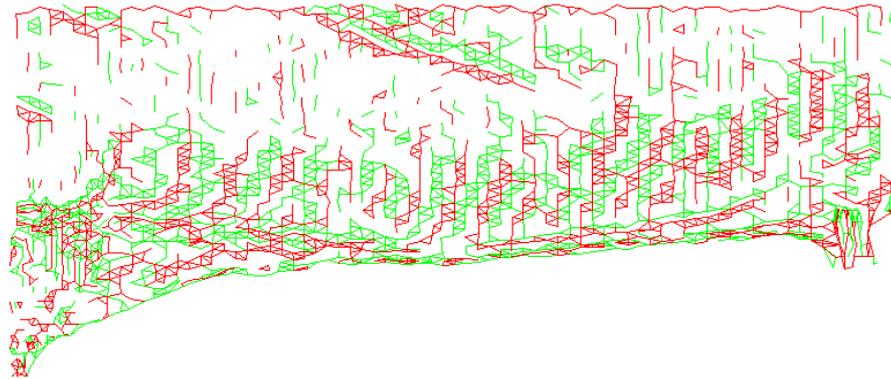
**Abbildung 3-13** Abflussbäume

Abbildung 3-13 zeigt die Abflussbäume in einem Gebiet. Es sind deutlich ausgezeichnete Abflussrichtungen zu erkennen.

Mit den Abflussbäumen allein können leider noch keine Strukturen bestimmt werden. Allerdings können die Anfangspunkte der Abflussbäume für die Ermittlung von Strukturen herangezogen werden. Die Anfangspunkte sind jeweils die höchsten Punkte. Verbindet man benachbarte Anfangspunkte so

erhält man Linien, die auf den höchsten Punkten des Geländes verlaufen. Diese Linien bilden im Allgemeinen die Kammlinien.

Analog zu Kammlinien existieren auch Tallinien. Für die Bestimmung der Tallinien wird das gesamte Gelände umgedreht. Die ehemals tiefsten Punkte sind nun die höchsten Punkte. Dadurch verlaufen auch die Abflussbäume in umgekehrter Richtung. Die Verbindung dieser Anfangspunkte führt zu den Tallinien.



**Abbildung 3-14** Kamm- (rot) und Tallinien (grün)

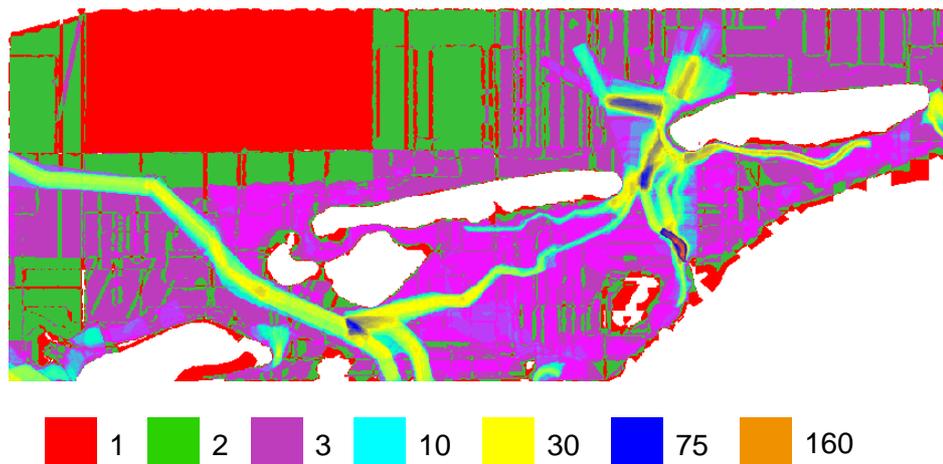
In der Abbildung 3-14 sind die generierten Strukturlinien dargestellt. Zwar ist das Verfahren noch nicht optimal, da teilweise Flächen anstatt Linien entstanden sind. Jedoch sind deutlich im Gebiet vorhandene Strukturen zu erkennen. Sehr deutlich ist der starke Wechsel der Kamm- und Tallinien zu erkennen, die kennzeichnend für Bodenstrukturen mit Transportkörpern sind.

### 3.5 Analysen auf den Metadaten

Auf Grund der engen Verbindung der Metadaten mit den eigentlichen Vermessungsdaten lassen sich erste Analysen allein auf den Metadaten durchführen. Beispiele für solche Analysen sind die Bestimmung der örtlichen Überdeckung oder die Größe der Messintervalle an einem Ort. Diese Informationen können einerseits für die Qualitätsbeschreibung der Punktmengen verwendet werden. Andererseits dienen sie auch als Auswahlkriterium oder Eingangsdaten für die zu verwendenden Interpolationsmethoden.

Der Großteil der Verfahren basiert auf der Betrachtung von einem Zeitstrahl an einem Ort über alle Zeitebenen. Die Darstellung der Ergebnisse dieser Verfahren wird im Folgenden auf der Basis eines regulären Rasters realisiert.

**Anzahl Messungen:** Die einfachste Untersuchung ist die Ermittlung der Anzahl der vorliegenden Messungen an einem Ort. Betrachtet man den Zeitstrahl, so durchdringt der Strahl verschiedene örtliche Aussagebereiche. Die Anzahl der Durchstoßpunkte wird dann als zeitliche Überdeckung der Messungen bezeichnet. Die Überdeckung ist ein erstes Kriterium, welches die Qualität der entstehenden digitalen Bathymetrien beeinflusst. Für viele Verfahren muss eine Mindestüberdeckung vorhanden sein, um überhaupt ein Bathymetriemodell erstellen zu können.



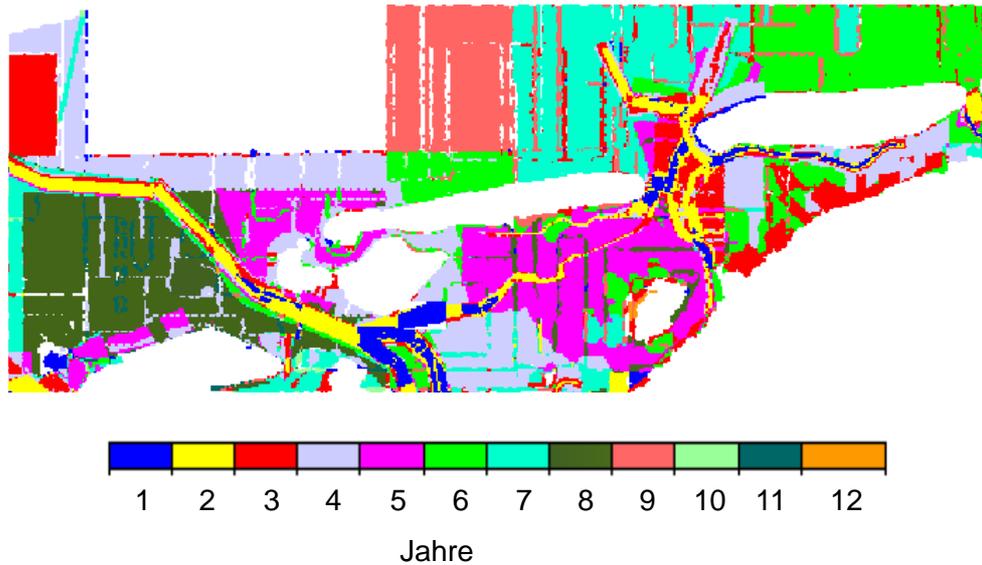
**Abbildung 3-15** Anzahl der sich örtlich überdeckenden Messungen

In Abbildung 3-15 ist die Anzahl der sich örtlich überdeckenden Messungen farblich kodiert dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass im Bereich der Fahrrienen sehr viele Messungen vorliegen, während auf den Wattflächen nur wenige Datensätze vorhanden sind. In Bereichen der Fahrrienen in denen sich Messkampagnen überlappen, kommt es sogar zu einer sehr hohen Anzahl von zur Verfügung stehenden Vermessungsdaten.

Neben der flächenhaften Darstellung können auch statistische Untersuchungen durchgeführt werden. So kann die Häufigkeit der Überdeckung ermittelt und dargestellt werden. Hierbei zeigt sich, dass nur ein geringer Anteil des betrachteten Gebietes eine größere Überdeckung als 10 hat, was etwa einer Messung pro Jahr entspricht.

**Messintervall:** Nicht nur die Anzahl der Messungen an einem Punkt ist von Interesse, sondern auch die Differenzen der Aufnahmezeitpunkte. Betrachtet werden können hierbei die kleinsten, größten oder mittleren Messintervalle.

Diese Analyse gibt weitere Hinweise auf die zeitliche Datendichte. Bei späteren Betrachtungen ist der zeitliche Abstand von großer Bedeutung. Er besitzt Auswirkungen auf die Vertrauenswürdigkeit der verschiedenen Interpolationen. Als Beispiel zeigt die folgende Abbildung die größten Messintervalle an einem Ort.



**Abbildung 3-16** größte zeitliche Differenz der Aufnahmepunkte

Gut erkennbar ist, dass nur in sehr wenigen Regionen regelmäßig und häufig vermessen wurde. Um in allen Bereichen Werte zu jedem Zeitpunkt ermitteln zu können, müssen vor allem Interpolationsmethoden verwendet werden. So liefert die Analyse der Differenzen einen eindeutigen Hinweis auf die zu verwendende Interpolationsmethode.

---

# Bathymetriesimulation



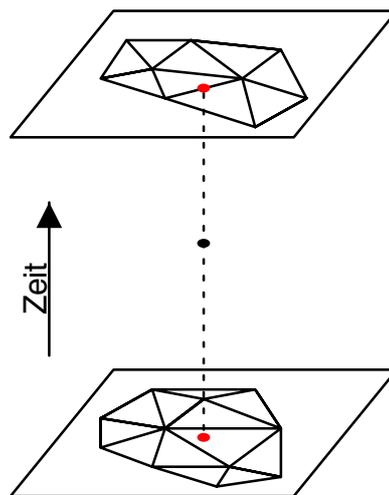
## 4

Vermessungsdaten bilden die Grundlage für die Beschreibung von Geländeoberflächen. Diese Vermessungsdaten werden mit unterschiedlichen Verfahren zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommen. Die räumliche Struktur und Auflösung sind ganz wesentlich vom verwendeten Messverfahren abhängig. So liefern Linienpeilungen unregelmäßig verteilte Daten geringer Auflösung und Laserscanbefliegungen reguläre Gitter von Höhenpunkten hoher Dichte. Die Übertragung dieser Höhen- bzw. Tiefeninformation auf die Fläche erfolgt durch Interpolationsverfahren. Dies bedeutet, dass die Tiefenwerte aufgrund von empirischen und normativen Annahmen über das übliche Verhalten oder die Entstehung der Oberfläche berechnet werden. Werden Messungen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden, berücksichtigt und liegt eine zeitliche Variabilität der Geländeoberfläche vor, so ist eine Übertragung der Interpolationsverfahren in Raum und Zeit notwendig. Zur Ermittlung räumlich konsistenter digitale Bathymetrien muss an jedem Ort und zu jedem Zeitpunkt ein zugehöriger Tiefenwert ermittelt werden.

Bevor auf die Berücksichtigung des zeitlichen Aspektes eingegangen werden soll, wird zunächst auf bestehende Verfahren zur räumlichen Interpolation eingegangen.

Die entwickelten räumlich-zeitlichen Interpolationsverfahren lassen sich, auf der Grundlage ihrer Konstruktion, in zwei Kategorien unterteilen. Es werden Interpolationsverfahren betrachtet, bei denen zunächst getrennte Interpolationen in Raum und Zeit vorgenommen werden und solche bei denen Raum und Zeit in der Interpolation direkt miteinander verknüpft sind.

Trennung von Raum und Zeit



Verknüpfung von Raum und Zeit

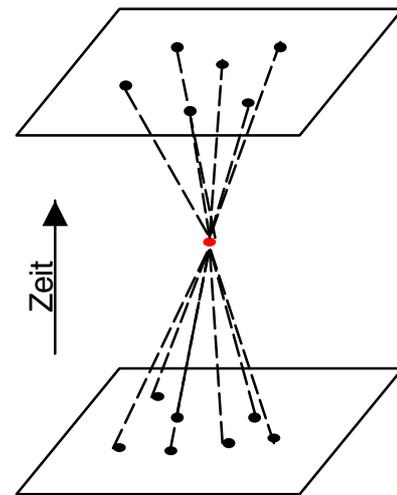


Abbildung 4-1 Klassen von Orts-Zeit-Interpolationen

Das allgemeine Vorgehen bei den getrennten Verfahren sieht zunächst örtliche Interpolationen in den einzelnen Zeitebenen vor, wonach dann diese Tiefenwerte als Stützstellen der zeitlichen Interpolation verwendet werden. Bei den gekoppelten Verfahren wird in einem Schritt eine räumlich-zeitliche Interpolation durchgeführt. Die gekoppelte Interpolation erfordert eine Verknüpfung zwischen zeitlichen und örtlichen Entfernungen und birgt das Potential weitergehende physikalische Prozesseigenschaften zu berücksichtigen.

## 4.1 Interpolation im Raum

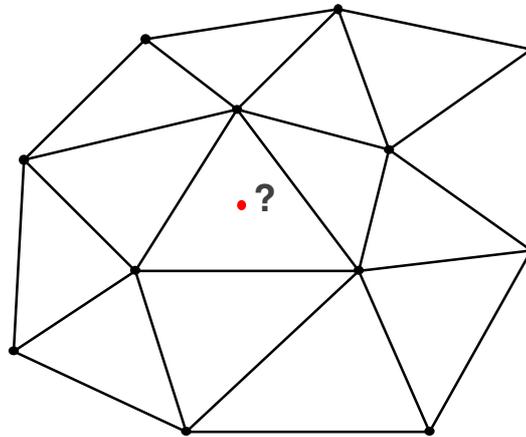
Räumliche Verfahren zur Ermittlung von Tiefenwerten auf der Basis diskreter Stützstellen sind in den letzten Jahrzehnten entwickelt und intensiv untersucht worden. Grundsätzlich kann zwischen Interpolations-/Extrapolations- und Approximations-Verfahren unterschieden werden.

**Inter-/Extrapolation:** Bei der Inter-/Extrapolation werden Werte an Positionen bestimmt, an denen keine diskreten Werte vorliegen. Der Unterschied der Interpolation zur Extrapolation ist, dass die Ergebnisse der Interpolation nicht über die Hülle der Ursprungsmenge hinausgehen, während bei der Extrapolation auch über die Grenzen der Ursprungsmengen hinaus Werte errechnet werden können. Beiden Verfahren ist zu eigen, dass sie die Werte der Ursprungsmenge immer genau wiedergeben.

**Approximation:** Bei der Approximation handelt es sich um ein Näherungsverfahren, bei dem die vorgegebenen Stützstellen für die Definition einer Funktion, die das Gelände beschreiben soll, verwendet werden. Im Gegensatz zur Interpolation muss die definierte Funktion nicht durch die gemessenen Werte gehen.

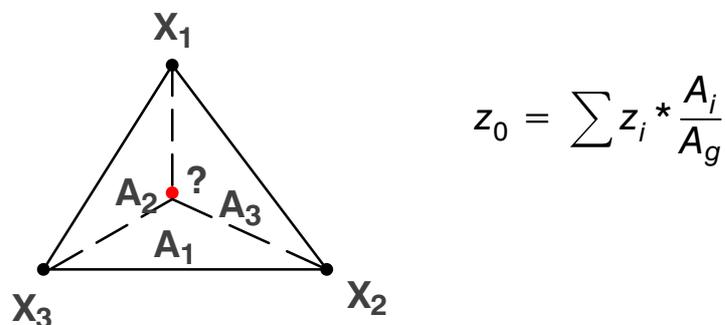
### 4.1.1 Interpolation auf Dreiecksnetzen

**Lineare Interpolation:** Die lineare Interpolation ist eine sogenannte netzbasierte Methode. Bei der linearen Interpolation werden maximal drei Bezugspunkte zur Ermittlung des zu interpolierenden Tiefenwertes herangezogen. Die Ermittlung dieser Bezugspunkte erfolgt auf der Grundlage einer Triangulation der Stützstellen.



**Abbildung 4-2** Delaunay-Triangulation einer Punktmenge

Für die Interpolation wird durch eine Suche im Dreiecksnetz das Dreieck bestimmt in dem der zu interpolierende Punkt liegt. Dadurch haben nur die direkt benachbarten Punkte einen Einfluss, weshalb auch von einer lokalen Methode gesprochen wird. Die Implementierung effizienter Verfahren zur Suche des Dreiecks machen die lineare Interpolation auf Dreiecksnetzen zu einem einfachen und schnellen Interpolationsverfahren.



**Abbildung 4-3** Rechenvorschrift der linearen Interpolation

Die lineare Interpolation führt zu einer  $c^0$ -stetigen Beschreibung der Geländeoberfläche. Ein Vorteil der netzbasierten linearen Interpolation ist darin zu sehen, dass als Basis alle Formen von Dreiecks-Zerlegungen verwendet werden können. Durch die Verwendung erzwingener Zerlegungen können zusätzliche Strukturinformationen bei der Interpolation berücksichtigt werden.

Die Interpolation von Werten kann nur innerhalb des Netzes erfolgen, so dass in der Regel keine Extrapolation von Werten außerhalb der konvexen Hülle erfolgen kann.

### 4.1.2 Sibson-Interpolation

**Sibson-Interpolation:** Ein weiteres netzbasiertes Interpolationsverfahren ist die Sibson-Interpolation, bei der Nachbarschaftsrelationen auf der Basis von Voronoi-Zerlegungen herangezogen werden.

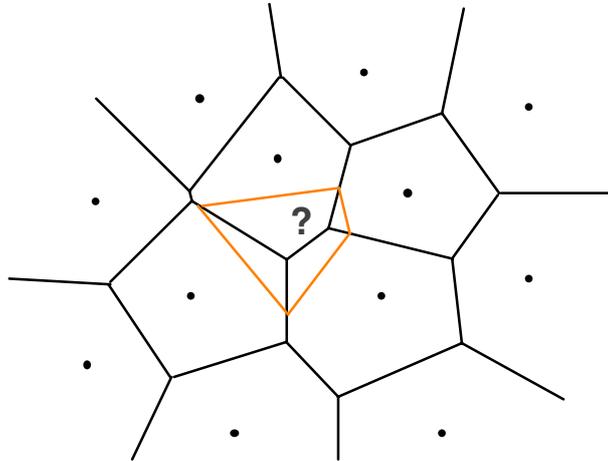


Abbildung 4-4 Voronoi-Zerlegung einer Punktmenge

Die Voronoi-Zerlegung teilt ein Gebiet in endlich viele Regionen auf. Jeder Region ist dabei ein Bezugspunkt zugeordnet. Bei der Sibson-Interpolation wird der zu interpolierende Punkt in die Voronoi-Zerlegung eingefügt. Beim Einfügen eines Punktes entsteht eine neue Gebietszerlegung. Der eingefügte Punkt verkleinert die bestehenden Voronoi-Regionen der Bezugspunkte. Für die Interpolation wird das Verhältnis der Teilflächen in Bezug auf die Gesamtfläche der neuen Zelle als Gewicht verwendet.

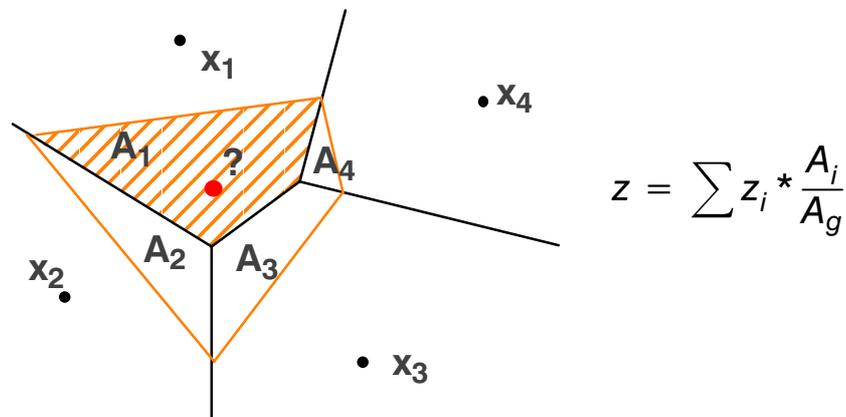


Abbildung 4-5 Sibson-Interpolation

Da die Voronoi-Zerlegung keinen Rand besitzt, ist es auch möglich, Bereiche außerhalb der Hülle der Punktmenge zu betrachten. Allerdings müssen die so interpolierten Werte bezüglich ihrer Aussagekraft bewertet werden.

### 4.1.3 Shepard-Interpolation

**Shepard-Interpolation:** Die Erzeugung strukturierter bzw. unstrukturierter Netze ist häufig aufwendig und kann durch ungünstige Wahl zu ungeeig-

neten Interpolationen führen. Bei den netzfreien Interpolationsmethoden, werden die expliziten Strukturangaben in Form von Netzen durch implizite Algorithmen ersetzt. Die Shepard-Interpolation geht davon aus, dass der Einfluss von Stützstellen mit dem umgekehrten Abstand zum betrachteten Punkt abnimmt. Werden zur Interpolation alle gemessenen Stützwerte herangezogen, spricht man von einer globalen Interpolationsmethode. Durch die Vorgabe von Suchradien läßt sich das Verfahren in eine lokale Interpolation überführen.

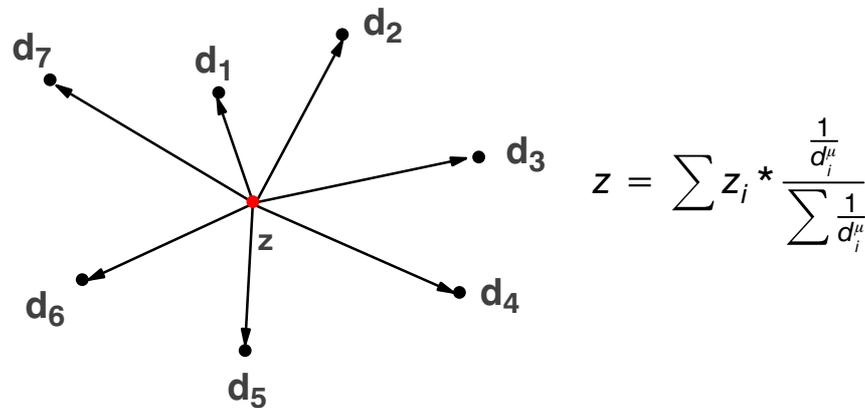


Abbildung 4-6 Interpolation mit umgekehrten Abständen

Für jeden Punkt wird ein Gewicht berechnet. Die Berechnung des Gewichtes erfolgt über das Verhältnis des Abstandes zur Summe aller Abstände. Als Erweiterung steht die Potenzierung der Abstände zur Verfügung. Dadurch kann erreicht werden, dass naheliegende Punkte einen stärkeren Einfluss bekommen als sehr weit entfernt liegende Punkte.

Die Shepard-Interpolation kommt häufig dann zum Einsatz, wenn die Dichte der Vermessungsdaten gering ist und/oder großräumige Tendenzen bei der Interpolation Berücksichtigung finden sollen. Als weiterer Vorteil der Shepard-Interpolation ist die Möglichkeit der Extrapolation auch außerhalb der konvexen Hülle der Vermessungsdaten zu nennen. Allerdings müssen die Ergebnisse ingenieurgerecht geprüft und bewertet werden.

Für eine große Anzahl von Stützstellen wird die Shepard-Interpolation sehr aufwendig. Während bei der linearen Interpolation für die Berechnung eines Punktes nur drei Punkte der Punktmenge berücksichtigt werden, verwendet die globale Interpolation mit umgekehrten Abständen immer alle Punkte der Punktmenge.

#### 4.1.4 Rasterapproximation

**Rasterapproximation:** Die bisherigen Verfahren waren hauptsächlich auf wenig dichte Punktmengen ausgelegt. Durch die Weiterentwicklung der Messtechniken werden immer hochauflösendere Datensätze verfügbar. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle ein Verfahren vorgestellt, welches zu einer Reduzierung der Datenmenge führt, wobei sämtliche Informationen der hochauflösenden Vermessungsdaten berücksichtigt werden. Bei der Rasterapproximation wird über das Gebiet ein beliebiges Raster gelegt und die Vermessungspunkte den Rasterzellen zugeordnet. Als Repräsentant einer

Rasterzelle wird in der Regel der Mittelpunkt (rot) und ein durch ein Mittelungsverfahren bestimmter Wert gewählt. Da bei dieser Vorgehensweise die entstehende Repräsentation der Geländeoberfläche nicht mehr durch die originalen Messwerte (schwarz) verläuft, wird von einem Approximationsverfahren gesprochen.

Als Berechnungsvorschrift für den Z-Wert des Repräsentanten kann beispielsweise der Mittelwert, der Median, der Minimal- oder der Maximalwert in einer Rasterzelle verwendet werden.

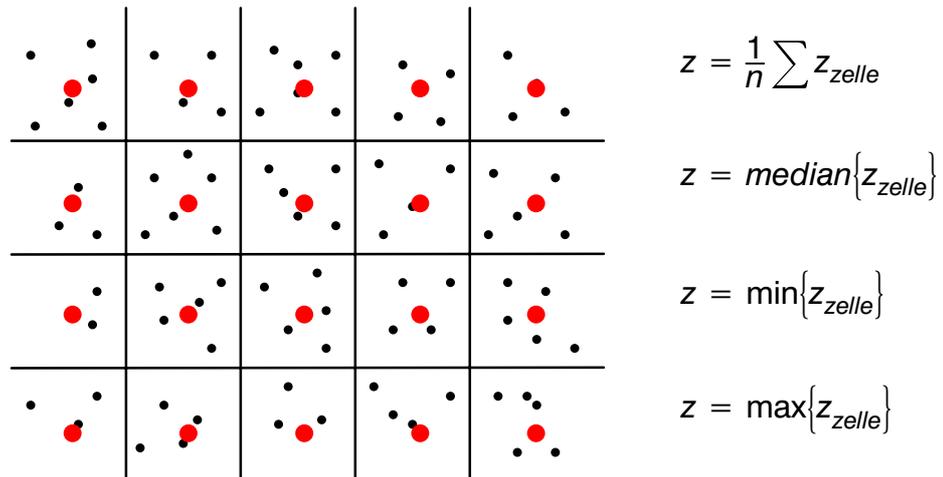


Abbildung 4-7 Prinzip der Rasterapproximation

### 4.1.5 Vergleich der räumlichen Interpolationen

Die Eigenschaften der beschriebenen Interpolationsmethoden im Raum werden im Folgenden an Vermessungsdaten des BSH (BSH\_10301) aus dem Projektgebiet dargestellt. Insbesondere soll auf die Unterschiede durch Differenzenbildung eingegangen werden. Hierzu werden die Tiefen im Untersuchungsgebiet auf ein reguläres Raster interpoliert, dessen Auflösung wesentlich höher ist als die Punktdichte der Vermessung ist.

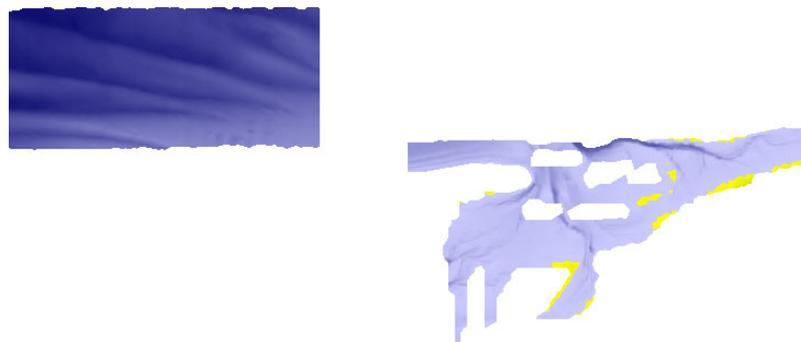
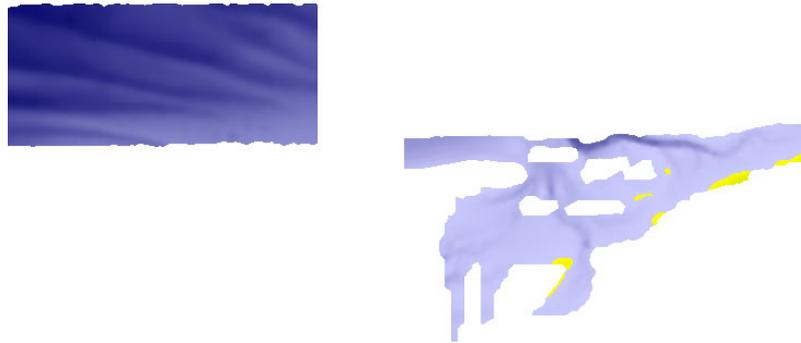
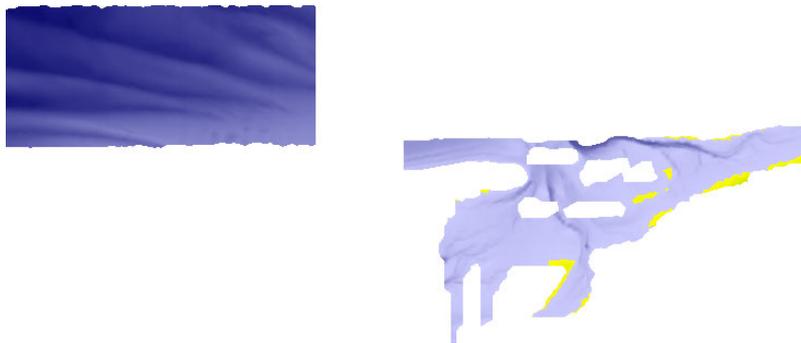


Abbildung 4-8 Lineare Interpolation für die Vermessung BSH\_10301



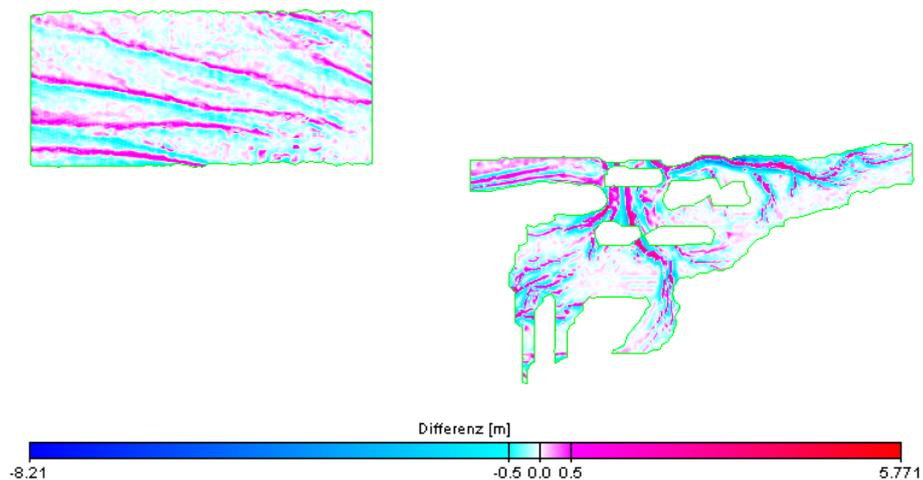
**Abbildung 4-9** Interpolation mit umgekehrten Abständen für die Vermessung BSH\_10301



**Abbildung 4-10** Sibson-Interpolation für die Vermessung BSH\_10301

Auf dem ersten Blick sind in den verschiedenen Interpolationen kaum Unterschiede zu erkennen. Dies zeigt zunächst, dass alle Verfahren ähnliche Ergebnisse liefern und somit als Interpolationsverfahren grundlegend geeignet sind.

Die Unterschiede der einzelnen Interpolationsmethoden zeigen sich, wenn die Differenzen der verschieden interpolierten digitalen Geländemodelle gebildet werden.

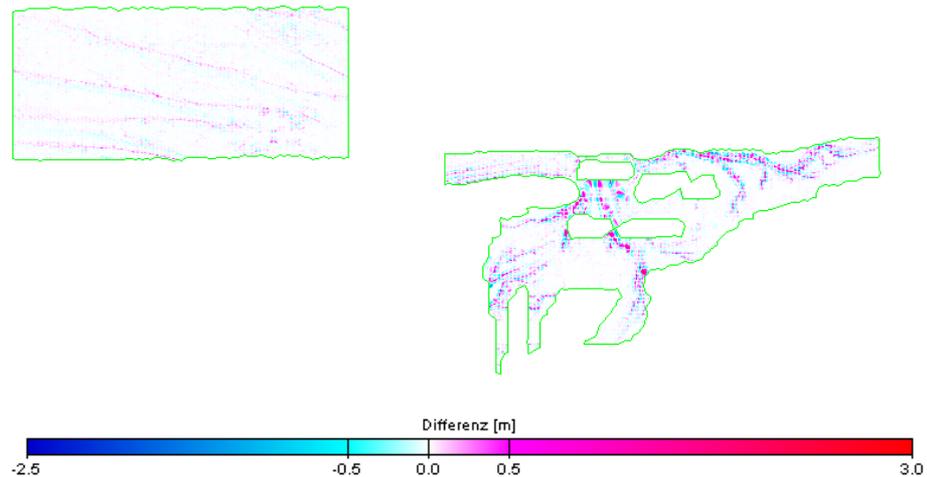


**Abbildung 4-11** Differenz lineare Interpolation und umgekehrte Abstände

Die statistische Verteilung der Differenzen ergibt, dass die meisten Differenzen (etwa 90%) zwischen -0,5 und 0,5 Metern liegen. Auffallend in der

Abbildung 4-11 ist der Vorzeichenwechsel der Differenz in der Nähe von ausgeprägten bathymetrischen Strukturen. Der Grund hierfür liegt in der "glättenden Wirkung" der Shepard-Interpolation. Bei der linearen Interpolation auf Dreiecken werden genau die drei nächsten Stützstellen berücksichtigt wohingegen bei der Interpolation mit umgekehrten Abständen auch weiter entfernte Stützstellen berücksichtigt werden.

Vergleicht man die Sibson-Interpolation mit der linearen Interpolation ist ein solches Phänomen nicht zu beobachten. Differenzen treten hier vor allem in der Nähe von Rinnen auf.



**Abbildung 4-12** Differenz lineare Interpolation und Sibson-Interpolation

Die Analyse der Verteilung der Messpunkte und der zugehörigen Triangulation zeigt, dass die größten Unterschiede zwischen den beiden Verfahren an den Kanten der Triangulation bestehen. Die Erklärung hierfür liegt in der unterschiedlichen Stetigkeit der Verfahren. Das Ergebnis einer linearen Interpolation ist eine funktionale Beschreibung der Bathymetrie die mindestens  $C_1$ -stetig bis auf die Kanten der Triangulation, in der sie nur  $C_0$ -stetig ist. An den Kanten der Triangulation kommt es zu Knicken in der berechneten Oberfläche. Bei der Sibson-Interpolation hingegen ist die errechnete Geländeoberfläche überall mindestens  $C_1$ -Stetigkeit. Das bedeutet, dass keine Knicke sondern ausgerundete Übergänge zwischen den Elementen entstehen. Dieser Unterschied führt zu den dargestellten Differenzen in der Abbildung 4-13.

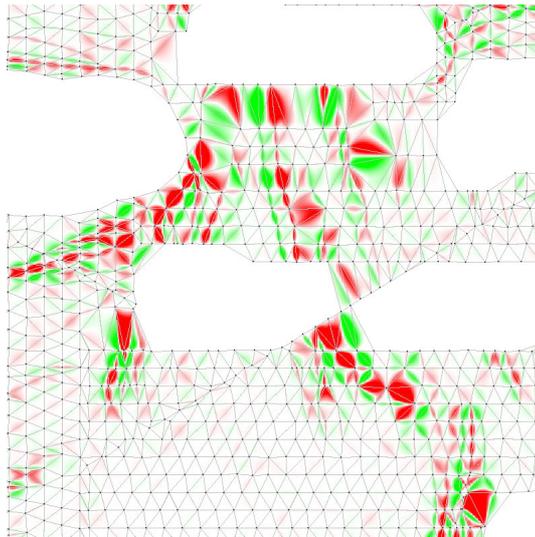


Abbildung 4-13 Differenz lineare Interpolation und Sibson-Interpolation

## 4.2 Bathymetriesimulation mit Trennung von Raum und Zeit

Die vorgestellten Interpolationsmethoden im Raum in Verbindung mit entsprechenden Aussagebereichen erlauben es, ausgehend von diskreten Vermessungsdaten auf die Tiefe an jedem Punkt des Aussagebereiches zu schließen. In den bisherigen Untersuchungen spielte die Zeit nur eine untergeordnete Rolle und war im Wesentlichen eine kennzeichnende Größe in den Metadaten. Sollen mehrere Messkampagnen für die Interpolation der Tiefenwerte herangezogen werden, so muss davon ausgegangen werden, dass diese Messungen zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommen wurden, wie dies in der Abbildung 4–14 schematisch dargestellt ist.

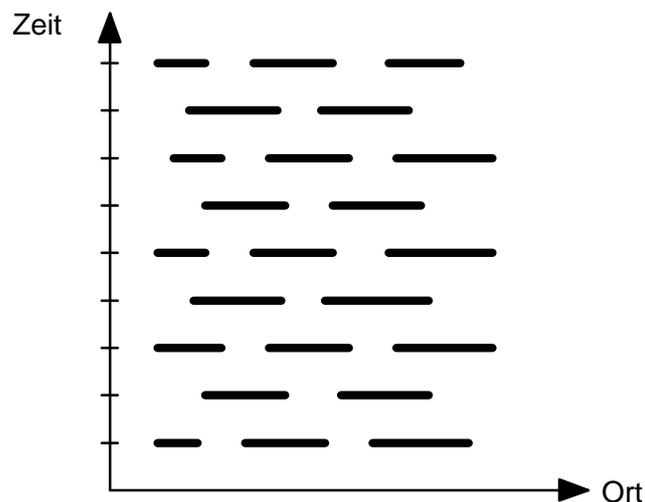


Abbildung 4-14 Schematische Darstellung der Vermessungen im Orts–Zeit–Diagramm

Die Berücksichtigung von Vermessungen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen worden sind, erfolgt derzeit durch das sogenannte Aufprägen neuerer Tiefeninformationen in ein schon bestehendes Gelände-

modell. Die Menge der örtlichen Positionen, an denen die Tiefenwerte bestimmt werden sollen, wird im Folgenden als Zielpunktmenge bezeichnet und kann beispielsweise ein Berechnungsnetz oder ein reguläres Punktraster sein.

### 4.2.1 Aufprägen

**Aufprägen:** Ausgehend von einer Zielpunktmenge werden beim Aufprägen die vorhandenen Messungen zeitlich geordnet. Beginnend bei der ältesten Messung werden alle Messungen nacheinander der Bathymetrie eingeprägt. So wird erreicht, dass entsprechend der örtlichen Interpolation der jeweils neueste Tiefenwert für die Bestimmung der digitalen Bathymetrie herangezogen wird.

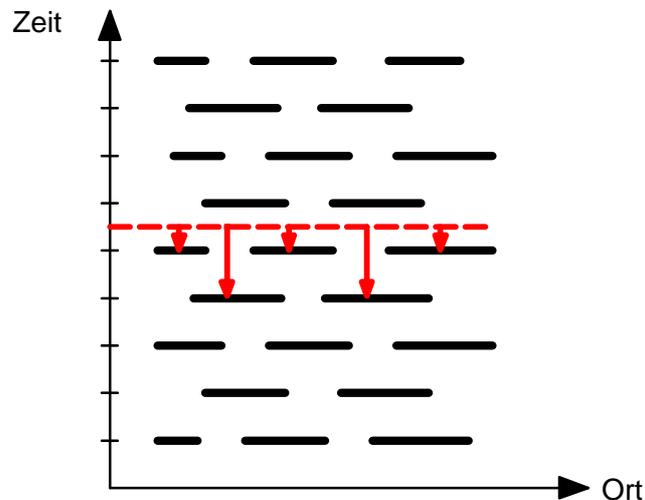
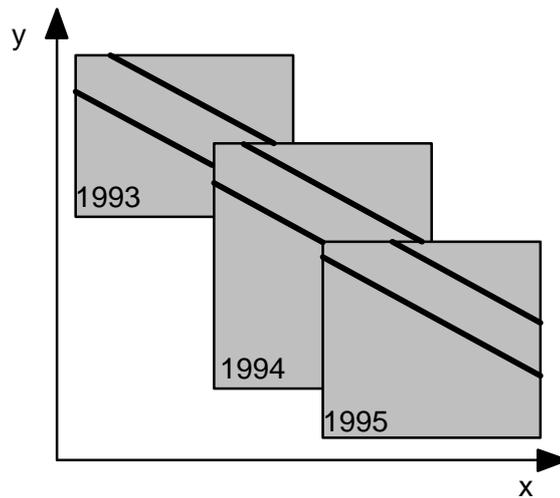


Abbildung 4-15 Prinzip des Aufprägens

An den Übergängen der einzelnen Messkampagnen kann es zu Inkonsistenzen kommen. Inkonsistenzen, beispielsweise in Form von Sprüngen, können dann entstehen, wenn räumlich benachbarte Messungen Monate bis Jahre auseinander liegen. Die während dieses Zeitraumes erfolgten morphologischen Veränderungen führen beispielsweise zu Rinnenverlagerungen, so dass die Darstellungen ein und derselben Bodenstruktur aus unterschiedlichen Messungen nicht mehr zusammenpassen. In der Abbildung 4-16 ist die Verlagerung einer Rinne und deren Wirkung auf ein durch Aufprägen entstandenes Gländemodell schematisch dargestellt.



**Abbildung 4-16** Problematik einer Rinnenverlagerung

Ausgehend von dieser einfachen Vorgehensweise zur Erstellung digitaler Bathymetrien wurde zunächst das Konzept der Interpolation auf Zeitstrahlen zur Generierung konsistenter digitaler Bathymetrien entwickelt. Der Zeitstrahl soll dabei, ausgehend von örtlichen Interpolationen in den einzelnen Messkampagnen, die Tiefenverhältnisse an einem Ort über einen Zeitraum beschreiben. Die so entstehenden Zeitreihen der Tiefenwerte an einem Ort bilden die Grundlage weiterführender Analysen als Basis für Interpolationsverfahren in der Zeit.

### 4.2.2 Lineare Interpolation

Die lineare Interpolation über die Zeit basiert auf der Modellvorstellung eines Funktionspolygons der Tiefenwerte an einem Ort über die Zeit.

**Lineare Interpolation über die Zeit:** Voraussetzung für die lineare Interpolation in der Zeit ist das Vorhandensein von einer Messkampagne vor dem zu interpolierenden Zeitpunkt und einer Messkampagne danach, deren Aussagebereiche die betrachtete Lokation enthalten. In den beiden zeitlich naheliegendsten Punktmengen wird am zu interpolierenden Ort mittels einer räumlichen Interpolation der Tiefenwert bestimmt. Die so ermittelten Werte dienen als Stützstellen für die lineare Interpolation in der Zeit.

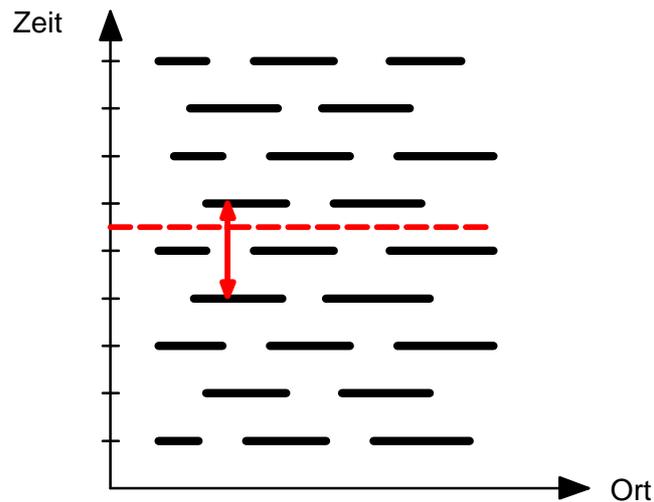


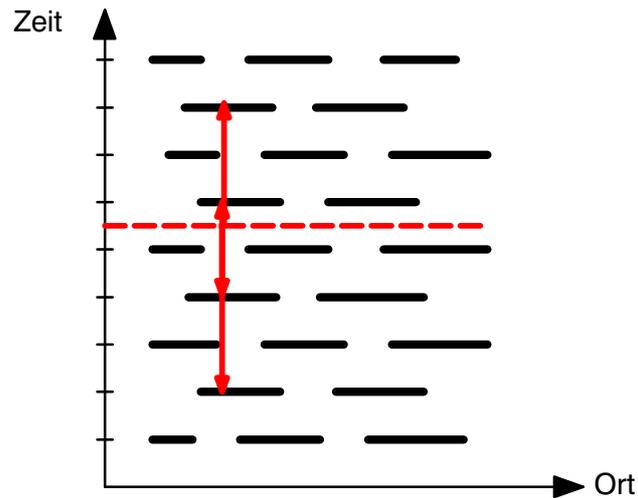
Abbildung 4-17 Lineare zeitliche Interpolation

Die Notwendigkeit von jeweils zwei Messkampagnen bedeutet zwangsläufig, dass keine Bathymetriesimulationen für die Zukunft bzw. für zukünftige Vorhersagen erstellt werden können. Dieses Verfahren eignet sich bei häufigen Vermessungen gut um morphologische Einflüsse und Entwicklungen der Vergangenheit zu simulieren und zu analysieren. Die Beschränkung auf genau zwei zeitlich benachbarte Vermessungen kann aufgehoben werden, wenn die örtliche Interpolation mit umgekehrten Abständen auf die Zeitskala übertragen wird.

### 4.2.3 Shepard-Interpolation

Die Interpolation mit umgekehrten Abständen wird als räumliche Interpolation häufig dann angewendet, wenn eine geringe Datendichte vorliegt und/oder wenn räumliche Tendenzen bei der Interpolation berücksichtigt werden sollen. Die globale Shepard-Interpolation berücksichtigt beispielsweise alle zur Verfügung stehende Messdaten. Die Übertragung der Shepard-Interpolation auf die Zeitachse eröffnet die Möglichkeit, sowohl längerfristige Tendenzen in der Interpolation zu berücksichtigen als auch Extrapolationen durchführen zu können.

**Interpolation mit umgekehrten Abständen:** Bei der zeitlichen Interpolation mit umgekehrten Abständen, werden die Schnittpunkte des Zeitstrahls mit den Aussagebereichen aller Messungen in die zeitliche Interpolation einbezogen. Das Gewicht einer jeden zeitlichen Stützstelle wird über den zeitlichen Abstand ermittelt. Je zeitlich näher ein Punkt ist, desto größer ist sein Gewicht und damit sein Einfluss.



**Abbildung 4-18** Zeitliche Interpolation mit umgekehrten Abständen

Die Verwendung von Potenzen des Abstandes bzw. von modifizierten Abstandsfunktionen ermöglicht eine flexible Anpassung der Interpolation. So können beispielsweise jüngere Vermessungen stärker berücksichtigt werden als ältere Vermessungsdaten.

### 4.2.4 Weitere Interpolationen und Approximationen

Betrachtet man an jedem Ort eine Zeitreihe der Tiefenentwicklung, so stehen alle bekannten Verfahren der Interpolation und Approximation von Zeitreihen zur Verfügung. Beispielsweise können Lagrange- oder Newton-Polynome für die Interpolation herangezogen werden oder Ausgleichskurven zur Trendanalyse und Approximation verwendet werden. Die Betrachtung der Zeitreihen der Tiefenentwicklung an einem Ort ermöglicht weitere Analysen und eröffnet insbesondere neue Möglichkeiten der Fehleridentifikation (siehe Kapitel 5.1.4).

## 4.3 Bathymetriesimulation in Raum und Zeit

Bei den bisher beschriebenen Interpolationsverfahren wurde immer von einer Trennung zwischen der räumlichen und zeitlichen Interpolation ausgegangen. Das bedeutet, dass im ersten Schritt eine räumliche Interpolation durchgeführt und erst in einem zweiten Schritt eine Interpolation in der Zeit durchgeführt wurde. Dieser Vorgehensweise ist recht einfach, da auf bekannte und ausgereifte Verfahren im Raum und auf wohlbekannte eindimensionale Interpolationen in der Zeit zurückgegriffen werden kann.

Ein wesentlicher Nachteil dieses Vorgehens ist, dass Zusammenhänge und Entwicklungen in Raum und Zeit nur bedingt berücksichtigt werden können. Hierzu zählen insbesondere die Verlagerung von Rinnen bzw. das Wandern von Sandbänken im Küstenvorfeld. Um solche Phänomene berücksichtigen zu können, müssen Ansätze mit einer direkten Kopplung von Raum und Zeit entwickelt werden.

Die direkte Berücksichtigung von Raum und Zeit in einem Interpolationsverfahren bedarf einer Verknüpfung der Raum- mit den Zeitkoordinaten. In Anlehnung an physikalische Gesetzmäßigkeiten scheint es sinnvoll zu sein, den Raum und die Zeit über eine Geschwindigkeit zu verknüpfen:

$$s = v \cdot t$$

Hierdurch kann die Zeit in einen räumlichen Abstand oder der räumliche Abstand in eine Zeit umgerechnet werden.

Der Grundgedanke der Verknüpfung ist relativ einfach. Allerdings ist die Wahl geeigneter Geschwindigkeiten schwierig. Die zu wählende Geschwindigkeit soll die Veränderung des Bodens über einen gewissen Zeitraum, z.B. ein Jahr, beschreiben. Der Verlagerung von Tiderinnen oder Sandbänken lässt sich eine solche Geschwindigkeit durch Beobachtung gut zuordnen. In den folgenden Untersuchungen wird gezeigt, dass die zu verwendende morphologische Geschwindigkeit sowohl vom betrachteten Ort als auch vom zugrundeliegenden Betrachtungszeitraum abhängen kann. Auf mögliche Strategien zur Bestimmung dieser Geschwindigkeiten wird im Abschnitt 4.3.5 und 5.1 näher eingegangen.

### 4.3.1 Globale Raum-Zeit-Interpolation

Die Shepard-Interpolation auf der Basis von Abstandsbestimmungen ist sowohl eine Interpolation im Raum als auch in der Zeit. Durch die Verknüpfung von Raum und Zeit über die Wahl einer geeigneten Geschwindigkeit, lässt sich die Zeit in eine entsprechende Entfernung umrechnen und im Rahmen einer globalen Raum-Zeit-Shepard-Interpolation nutzen.

**Globale Raum-Zeit-Interpolation:** Die globale Raum-Zeit-Interpolation beruht auf der Interpolation mit umgekehrten Abständen. Die Gewichte der Punkte werden dabei über den Kehrwert der Abstände berechnet.

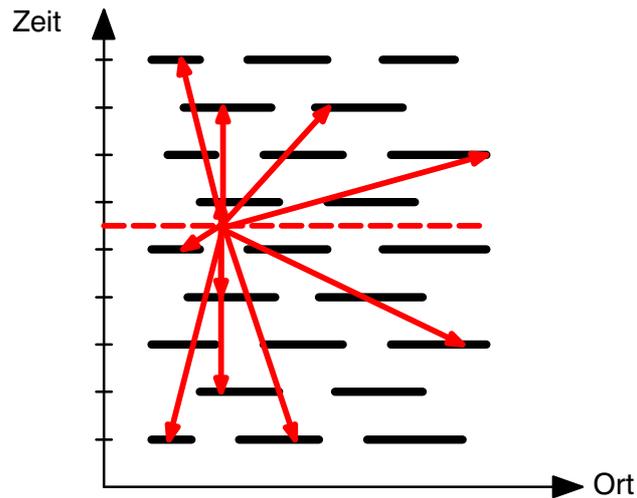


Abbildung 4-19 Globale Raum-Zeit-Interpolation

Wie in der Abbildung 4-19 zu erkennen, werden sämtliche Punkte berücksichtigt. Da bei der Gewichtung die umgekehrten Abstände berücksichtigt werden, besitzen weit entfernte Punkte nur noch einen sehr geringen Einfluss. Werden weit entfernte Punkte vernachlässigt, so kann die globale Interpolationsmethode in eine lokale Methode überführt werden.

#### 4.3.2 Lokale Raum-Zeit-Interpolation

**Raum-Zeit-Kugel:** Die lokale Raum-Zeit-Interpolation kann auch als Raum-Zeit-Kugel bezeichnet werden. Für die Raum-Zeit-Kugel wird ein Abstand definiert, der als Begrenzung für die Berücksichtigung der Punkte dient. Da der Abstand von einem Punkt berechnet wird und in alle Richtungen gleich ist, bildet er eine Art Kugel in Raum und Zeit.

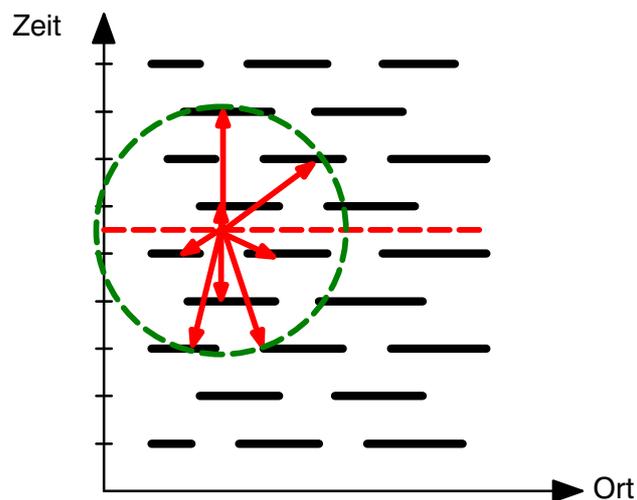


Abbildung 4-20 Shepard-Interpolation mit Raum-Zeit-Kugel

Die Abbildung 4-20 zeigt deutlich, dass nur eine bestimmte Anzahl von Messpunkten berücksichtigt wird. Dadurch kann der Aufwand der Berechnung erheblich verringert werden.

Da zwischen Raum und Zeit nicht unterschieden wird, verschmelzen unterschiedliche örtliche und zeitliche Effekte und Einflüsse bei dieser Interpolation. Eine Differenzierung von örtlichen und zeitlichen Einflüssen im Prozess der Interpolation lässt sich durch die Betrachtung von Zeitkegeln erreichen.

**Zeitkegel:** Der Ansatz über einen Zeitkegel geht davon aus, dass der Einflussradius mit der Zeit zunimmt. Das bedeutet, dass zum Zeitpunkt des Bezugspunktes nur der Bezugspunkt selbst berücksichtigt wird. Je weiter eine Messung zeitlich entfernt liegt, desto größer ist der Radius der zu berücksichtigenden Punkte.

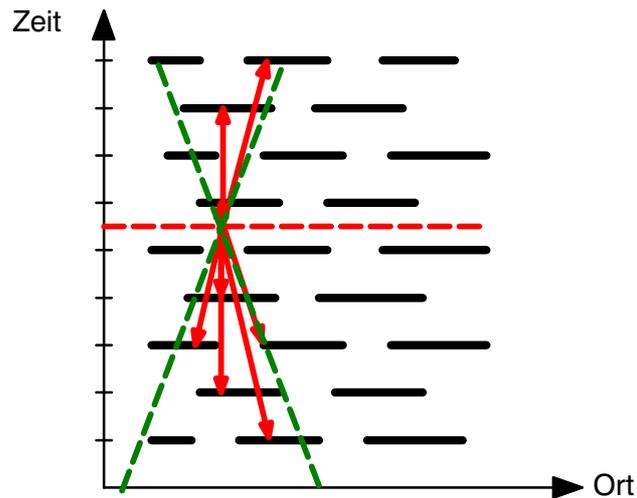


Abbildung 4-21 Prinzip des Zeitkegels

Das Prinzip des Zeitkegels ist in Abbildung 4-21 dargestellt. Am Bezugspunkt verschwindet der Radius des Kegels. Je weiter die zu berücksichtigenden Messungen zeitlich entfernt liegen, desto größer wird der Radius des Zeitkegels. Alle Punkte die innerhalb des Zeitkegels liegen, werden für die Interpolation verwendet. Um einen Wert für den Bezugspunkt zu ermitteln, wird wieder die Interpolation mit umgekehrten Abständen verwendet. Dabei werden die zeitlichen Abstände mit Hilfe der Geschwindigkeit in räumliche Abstände umgerechnet. Der Öffnungswinkel des Raum-Zeit-Kegels ist wiederum eine Funktion der am betrachteten Ort vorherrschenden morphologischen Gegebenheiten. Er kann in Abhängigkeit von der morphologischen Geschwindigkeit gewählt werden.

Beim Zeitkegel wird davon ausgegangen, dass der Einfluss der Vermessungspunkte auf den zu interpolierenden Ort aus allen Richtungen gleich ist. Häufig lässt sich im Küstenvorfeld jedoch eine ausgeprägte Transportrichtung identifizieren.

**Geneigter Zeitkegel:** Für den geneigten Zeitkegel wird von einer ausgezeichneten Bewegungsrichtung in der Umgebung des zu interpolierenden Punktes ausgegangen. Ist diese Richtung bekannt, so kann der Zeitkegel so verändert werden, dass er die Bewegungsrichtung berücksichtigt.

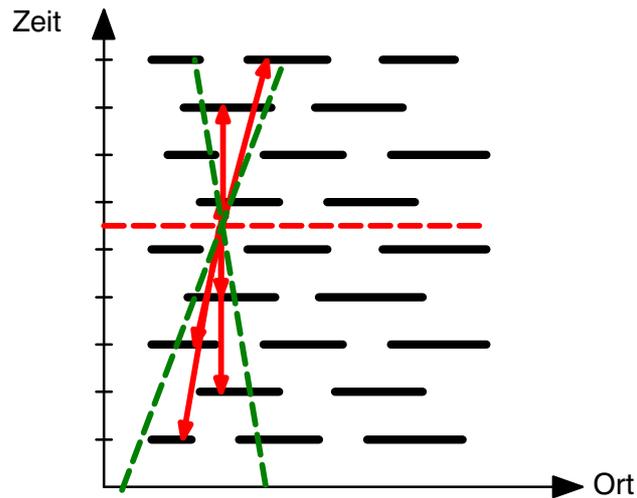


Abbildung 4-22 Prinzip des geneigten Zeitkegels

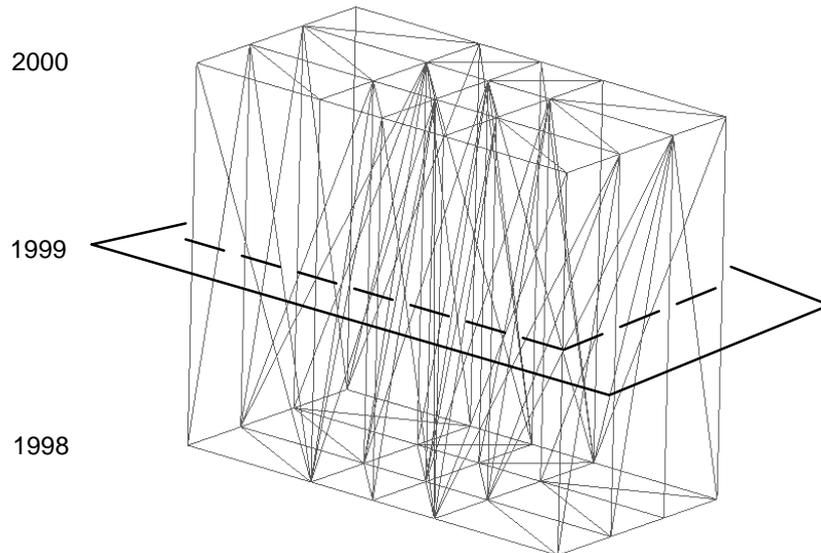
Die Bewegungsrichtung beschreibt die vorherrschende Wanderungsrichtung des Sohlmaterials. Somit besitzen Messpunkte der Vergangenheit entgegengesetzt der Transportrichtung mehr Einfluss. Dieser Aspekt kann durch die Neigung bzw. durch verschiedene Öffnungswinkel des Kegels berücksichtigt werden.

Eine weitere Verfeinerung dieser Herangehensweise liegt in der Veränderung der Form des Kegels. Durch eine Veränderung der Form, weg vom Kreis zur Ellipse, können weitere Anpassungen der Interpolationsvorschrift an die natürlichen Gegebenheiten erreicht werden.

### 4.3.3 Netzbasierte Raum-Zeit-Interpolation

Der Einsatz von netzbasierten Methoden zur Interpolation bei der digitalen Geländemodellierung ist weit verbreitet. Ihre grundlegenden Eigenschaften wurden im Kapitel 4.1.1 dargestellt. Die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Punkten einer Menge werden durch ein Netz beschrieben. Bei der Definition eines Netzes gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten. Die Verwendung von Dreiecksnetzen bietet für unstrukturierte Punktmengen im zweidimensionalen Raum eine Reihe von Vorteilen. Dazu gehört, dass sich eine Gebietszerlegung durch Dreiecke mit ausgereiften Algorithmen relativ einfach realisieren lässt. Es war naheliegend, die bekannten netzbasierten Interpolationsverfahren auf ihre Übertragbarkeit für Raum-Zeit-Interpolationen zu untersuchen.

Die Grundlage dieser Interpolationen sind Tetraederzerlegungen im dreidimensionalen Orts-Zeit-Raum aller Vermessungsdaten. Der Aussagebereich ergibt sich bei den netzbasierten Interpolationen zunächst aus der konvexen Hülle aller Messungen. Die Bestimmung nicht-konvexer Aussagebereiche in Raum und Zeit ist Gegenstand aktueller Forschungen.



**Abbildung 4-23** Schematische Darstellung einer Tetraederzerlegung mit zugehörigem Zeit-Schnitt

Die gesuchte konsistente digitale Bathymetrie kann dann als Schnitt durch den triangulierten Orts-Zeit-Raum aller Vermessungen aufgefasst werden. Auch bei den netzbasierten Interpolationen spielt die Übertragung der Zeit in eine örtliche Ausdehnung eine wichtige Rolle für die Qualität der Interpolationen.

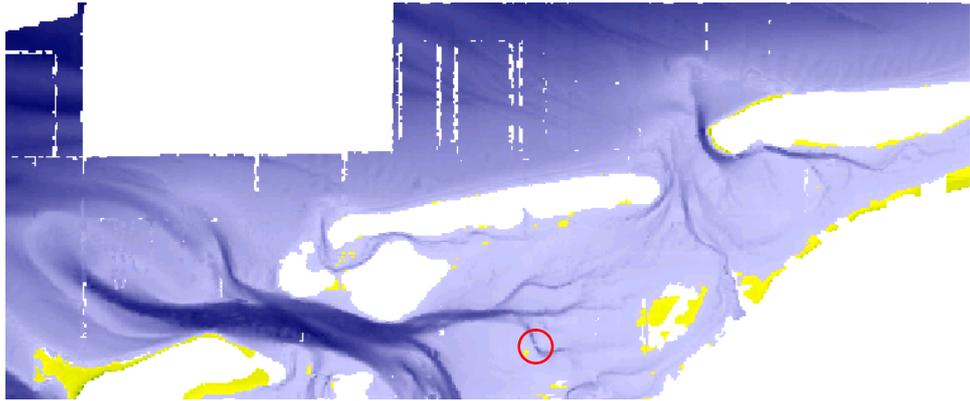
Im Rahmen des Forschungsprojektes KoDiBa wurden zunächst Triangulationen von Schnitten untersucht und dabei das Konzept der Orts-Zeit-Bruchkante entwickelt. Auf Grund der großen Zahl der zu berücksichtigenden Vermessungsdaten des Projektgebietes und des damit verbundenen großen Aufwandes bei der Ermittlung der Tetraederzerlegung wurden die netzbasierten Verfahren nicht weiter untersucht.

### 4.3.4 Vergleich der Raum-Zeit-Interpolationen

Die entwickelten Verfahren wurden an unterschiedlichen Szenarien im Projektgebiet getestet. Für die vergleichenden Untersuchungen wurde als Zeitpunkt für die Bathymetriesimulationen der 1. Januar 1998 gewählt. Zunächst werden die Verfahren mit Trennung von Raum und Zeit betrachtet und im zweiten Teil dieses Abschnittes die kombinierten Verfahren.

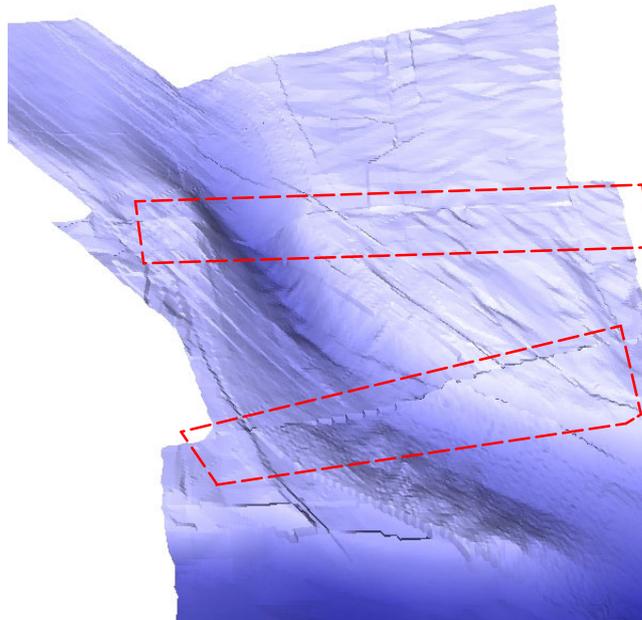
#### Trennung von Raum und Zeit

**Aufprägen:** Als erstes Verfahren wurde die heute häufig verwendete Herangehensweise des Aufprägens der jeweils neuesten Tiefe zur Erstellung digitaler Bathymetrien betrachtet.



**Abbildung 4-24** Aufgeprägte Bathymetriesimulation für das Jahr 1998

Die Abbildung 4-24 zeigt die aufgeprägte Bathymetriesimulation für das Jahr 1998. Es sind deutlich Löcher in der Geländeoberfläche zu erkennen. Diese Löcher entstehen aufgrund der mangelnden Datenlage in den vorangegangenen Jahren.



**Abbildung 4-25** Ausschnitt der aufgeprägte Bathymetriesimulation (1998)

In der Abbildung 4-25 sind gut die auftretenden Inkonsistenzen zu erkennen, wenn Vermessungen die zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommen wurden aneinandergrenzen. Bilden so generierte digitale Bathymetrien die Grundlage numerischer Simulationsmodelle, insbesondere für morphodynamische Modelle, so kommt es zu unplausiblen Simulationsergebnissen.

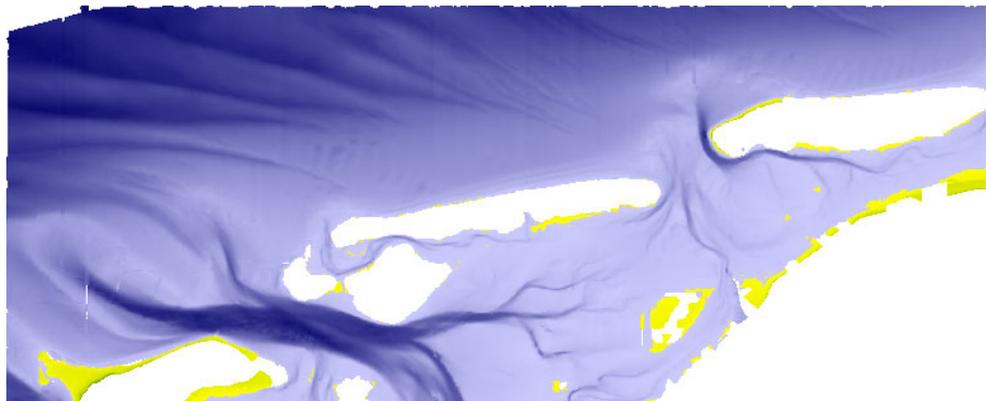
**Lineare Interpolation in der Zeit:** Die Betrachtung von Zeitstrahlen an jedem zu interpolierenden Ort ermöglicht eine lineare Interpolation in der Zeit, wenn sowohl vor dem betrachteten Zeitpunkt als auch danach entsprechende Vermessungen vorliegen.



**Abbildung 4-26** Bathymetriesimulation für das Jahr 1998 (lineare Interpolation)

Das Ergebnis der linearen Interpolation in der Zeit ist in Abbildung 4-26 dargestellt. Es sind deutliche Lücken zu erkennen. Die Bereiche für die keine Tiefenwerte ermittelt werden können sind größer als beim Erstellen digitaler Bathymetrien durch Aufträgen. Dies liegt im Wesentlichen darin begründet, dass für die lineare Interpolation eine Messung zu einem vorherigen und eine Messung zu einem späteren Zeitpunkt vorliegen muss. Dies ist nicht immer der Fall, so dass größere Lücken entstehen. Durch die lineare Interpolation werden die Werte der Bathymetriesimulation aus zwei Messungen ermittelt, wodurch ein Teil der Inkonsistenzen die beim Aufprägen zu beobachten waren verringert wurden bzw. ganz verschwunden sind.

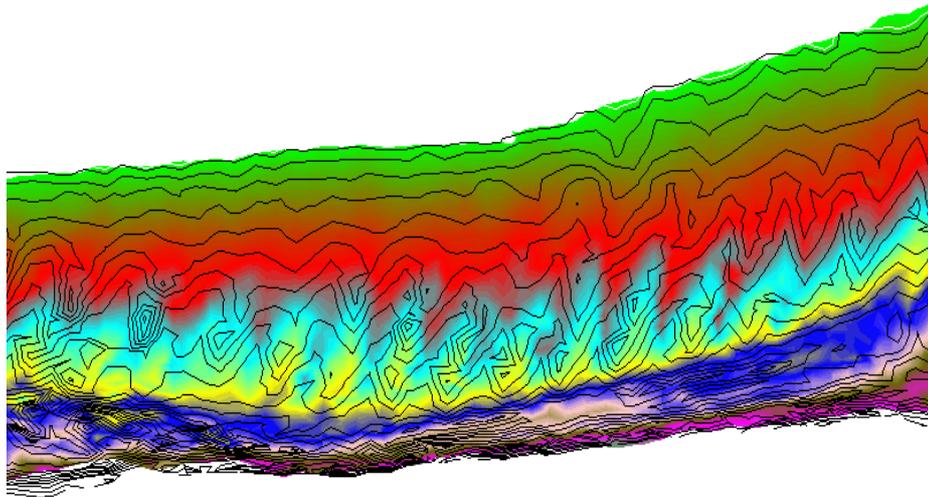
**Zeitliche Interpolation mit umgekehrten Abständen:** Die Bathymetriesimulation auf der Basis der Interpolation mit umgekehrten Abständen in der Zeit (Abbildung 4-27) besitzt kaum noch Lücken im Untersuchungsgebiet. Die Interpolation mit umgekehrten Abständen benötigt mindestens eine Messung. Dabei kann der Aufnahmezeitpunkt der Messung, vor oder nach dem Zeitpunkt der Bathymetriesimulation liegen.



**Abbildung 4-27** Bathymetriesimulation (umgekehrte Abstände)

Die Bereiche an denen Inkonsistenzen zu beobachten sind verschwinden fast vollständig. Die noch verbleibenden Inkonsistenzen treten in der Regel dort auf, wo nur wenige Datensätze vorliegen. Für das Interpolationsverfahren mit umgekehrten Abständen reicht zwar schon eine Messung aus. Allerdings sind die interpolierten Tiefenwerte erst bei mehreren vorhandenen Messungen vertrauenswürdig.

**Verifikation:** Um die Qualität der entwickelten Interpolationsverfahren weiter zu quantifizieren, wurden für einen Bereich vor Norderney aus den Vermessungsdaten des BSH der Datensatz für 1995 entfernt. Auf der Basis der verbleibenden Daten wurde für den 01.01.1995 eine Tiefenverteilung interpoliert. In der Abbildung 4-28 sind die interpolierten Tiefen als Flächen und die gemessene Tiefenverteilung als Isolinien dargestellt. Auf den ersten Blick ist eine recht gute Übereinstimmung zwischen der interpolierten und der gemessenen Tiefenverteilung zu erkennen. Größere Differenzen treten in Bereichen größerer morphologischer Aktivitäten auf. Ein wesentlicher Grund hierfür liegt darin begründet, dass durch die Betrachtung senkrechter Zeitstrahlen die vorherrschende Transportrichtung von West nach Ost bei der Interpolation nicht berücksichtigt wird.



**Abbildung 4-28** Vergleich einer errechneten und gemessenen Bathymetrie

Eine Verbesserung der Interpolationsergebnisse in Bereichen hoher morphodynamischer Aktivitäten lässt sich erreichen, wenn die Vermessungsintervalle verkürzt werden bzw. wenn physikalische Aspekte bei der Interpolation der Tiefenverteilungen berücksichtigt werden.

#### **Kopplung von Raum und Zeit**

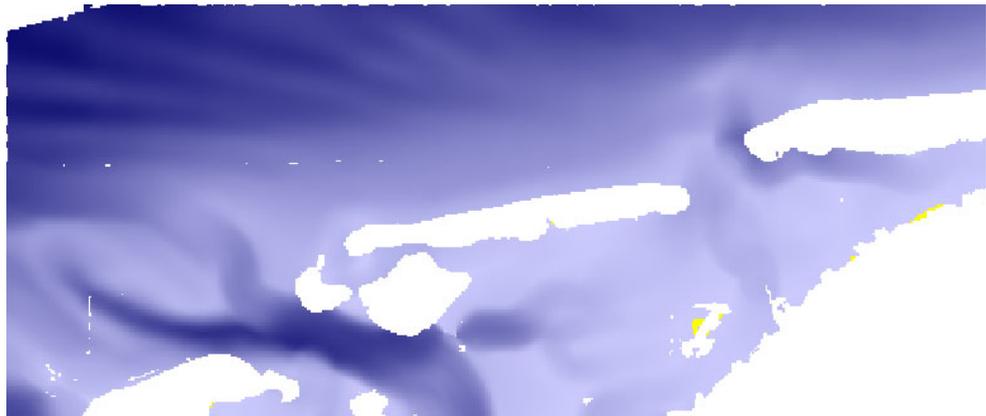
Weitere Verbesserungen der Interpolationsergebnisse lassen die Interpolationsverfahren mit direkter Kopplung von Raum und Zeit bei geeigneter Wahl der charakteristischen Geschwindigkeiten erwarten. Die Wahl der geeigneten morphologischen Geschwindigkeiten ist in der Regel vom Ort und unter Umständen auch von den meteorologischen Rahmenbedingungen abhängig. Für diese Untersuchungen wurden zunächst global konstante Geschwindigkeiten gewählt und deren Einfluss auf die erzeugten digitalen Bathymetrien untersucht.

Sowohl die globale Raum-Zeit-Interpolation auf der Basis der Shepard-Interpolation als auch die netzbasierte Interpolation erfordern die Berücksichtigung aller zur Verfügung stehenden Vermessungsdaten des Untersuchungsgebietes (ca. 10 Millionen Messpunkten). Die dreidimensionale Triangulation als auch die Berechnung der umgekehrten Abstände übersteigt die derzeitigen rechentechnischen Möglichkeiten. Eine effiziente Strukturierung dieser Daten ist für globale Interpolationsmethoden und

Triangulationsverfahren aufwendig und wurde im Rahmen von KoDiBa nicht weiter untersucht.

**Raum-Zeit-Kugel:** Für die Raum-Zeit-Kugel wird neben der morphologischen Geschwindigkeit auch ein Wert für den Radius der zu berücksichtigenden Messwerte benötigt. Der Radius kann eine Zeit oder eine Strecke sein, da diese über die morphologische Geschwindigkeit ineinander umgerechnet werden können.

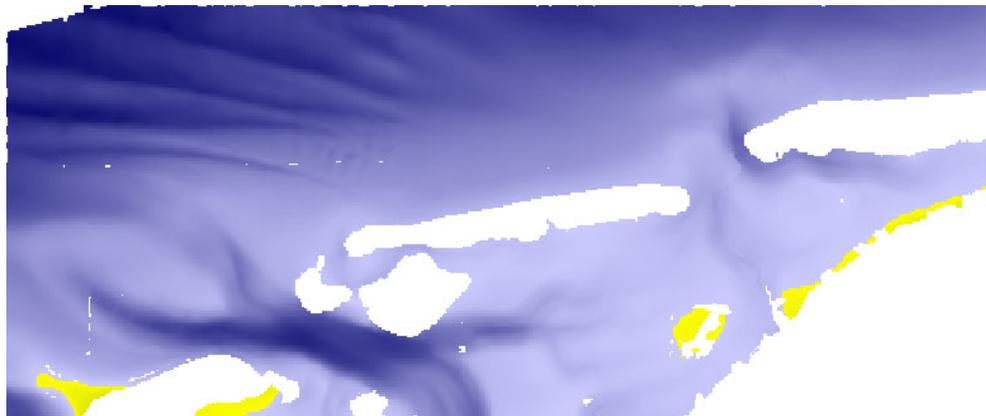
In einer ersten Untersuchung wurde eine morphologische Geschwindigkeit von 100 m/Jahr und ein Radius von 5 Jahren bzw. 500m gewählt. Die so errechnete Bathymetriesimulation ist in Abbildung 4-29 dargestellt.



**Abbildung 4-29** Bathymetriesimulation für das Jahr 1998 (Raum-Zeit-Kugel)

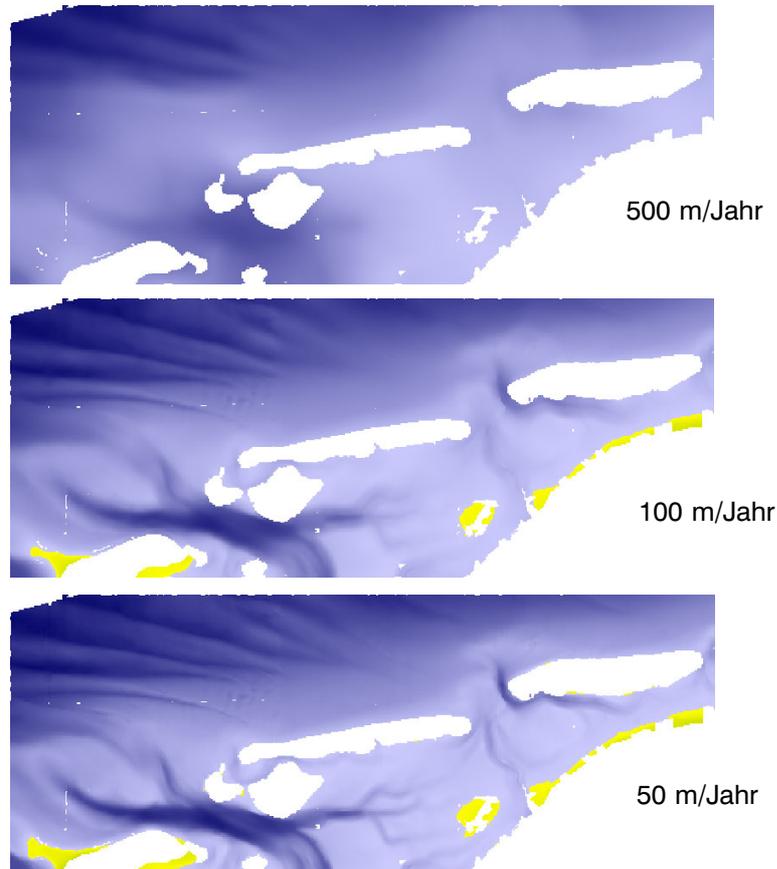
Wie in der Abbildung 4-29 zu erkennen, entstehen bei der Interpolation auf der Basis der Raum-Zeit-Kugel sehr weiche Übergänge. Das bedeutet, dass die Raum-Zeit-Kugel bei der gewählten Geschwindigkeit und dem Radius die Bathymetrie glättet. Die groben Strukturen des Untersuchungsgebietes sind noch zu erkennen. Allerdings werden kaum feinere Strukturen abgebildet.

**Raum-Zeit-Kegel:** Im Gegensatz zur Raum-Zeit-Kugel benötigt der Raum-Zeit-Kegel nur eine morphologische Geschwindigkeit. Der Öffnungswinkel des Raum-Zeit-Kegels ergibt sich aus der gewählten Geschwindigkeit.



**Abbildung 4-30** Bathymetriesimulation für das Jahr 1998 (Raum-Zeit-Kegel)

Im Gegensatz zur Interpolation auf der Basis der Raum-Zeit-Kugel sind beim Raum-Zeit-Kegel mehr Strukturen zu erkennen. Der Einfluss der gewählten morphologischen Geschwindigkeit ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



Bei Verwendung geringerer Geschwindigkeiten degeneriert der Zeitkegel zum Zeitstrahl und somit zur Interpolation mit Trennung von Raum und Zeit. Die geeignete Wahl der zugrundeliegenden morphologischen Geschwindigkeiten hat einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der interpolierten digitalen Bathymetrie.

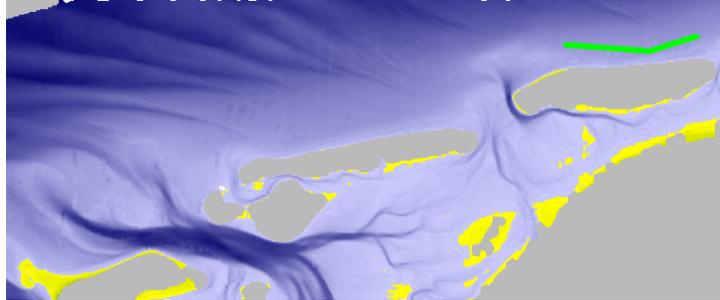
#### 4.3.5 Bestimmung morphologischer Geschwindigkeiten

Für direkt gekoppelte Raum-Zeit-Interpolationen ist es notwendig, die Raumkoordinate und die Zeitkoordinate konsistent miteinander zu verbinden. Diese Kopplung erfolgt durch die geeignete Wahl morphologischer Geschwindigkeiten.

**Morphologische Geschwindigkeit:** Durch die Bewegungen des Wasserkörpers ist der Meeresboden einer ständigen Veränderung unterworfen. Beispiele für gut zu beobachtende Veränderungen sind die Verlagerung von Rinnen oder das Wandern großer morphologischer Strukturen, wie Rippeln und Dünen, im Küstenvorfeld. Auf der Basis solcher Strukturen lassen sich räumliche und zeitliche Veränderungen betrachten und morphologische Geschwindigkeiten bestimmen.

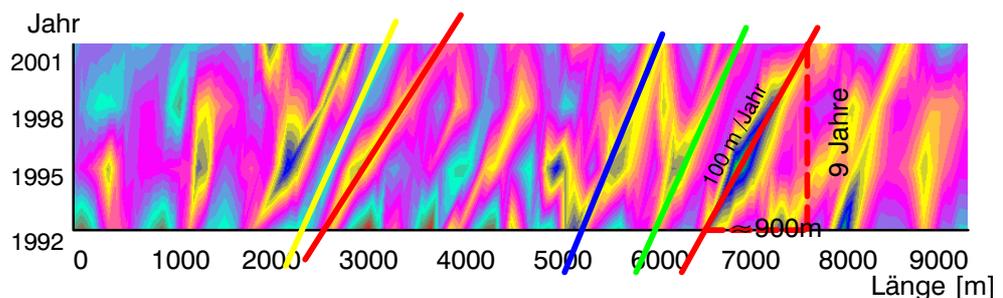
### 4.3 Bathymetriesimulation in Raum und Zeit, Fortsetzung

Auf Grund der Lage der ostfriesischen Inseln in der Deutschen Bucht als auch der vorherrschenden meteorologischen Verhältnisse haben sich vor den ostfriesischen Inseln charakteristische Transportkörper ausgebildet. Diese wurden als Indikatoren für die zu berücksichtigenden morphologischen Geschwindigkeiten herangezogen.



**Abbildung 4-31** Projektgebiet mit betrachteten Schnitt

Die Auswertung der Tiefenentwicklung an einem Schnittprofil vor der Insel Norderney ermöglichte die Abschätzung charakteristischer Geschwindigkeiten.



**Abbildung 4-32** 2.5 dimensionale Darstellung der Tiefenentwicklung an einem Schnitt

In der Abbildung 4-32 ist die Laufkoordinate des Schnittes aus Abbildung 4-31 und der Zeitpunkt, zu dem eine Tiefe ermittelt wurde, dargestellt. Der Tiefenwert ist farblich kodiert dargestellt. In dieser Darstellung lassen sich charakteristische Geschwindigkeiten zwischen 50 bis 130 m pro Jahr identifizieren.

Schon im betrachteten Schnitt vor Norderney ist erkennbar, dass die morphologischen Veränderungen örtlich zu differenzieren sind. Eine weitere Abhängigkeit von der Zeit, entsprechend dem meteorologische Geschehen führt dazu, morphologische Geschwindigkeiten als ein dreidimensionales Vektorfeld zu betrachten. So existiert zu jedem Zeitpunkt an jeder Stelle eine entsprechende Geschwindigkeit. Die Bestimmung dieser morphologischen Geschwindigkeiten erfordert weiterführende Untersuchungen und Analysen.

## 4.4 Bewertung der Interpolierten digitalen Bathymetrien

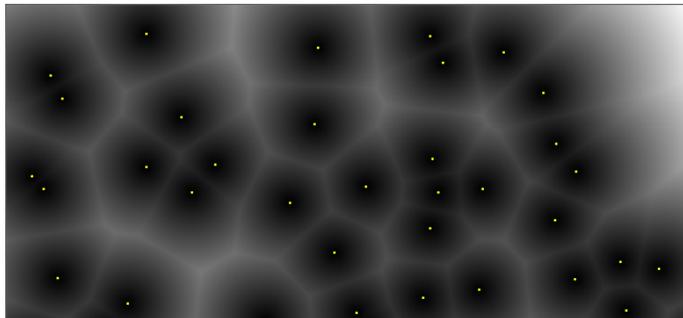
Für die Bewertung der Qualität der simulierten digitalen Bathymetrien ist auch die Frage nach dem Vertrauen in das Ergebnis von Bedeutung. Dabei wird wie bei der Interpolation zunächst der räumliche und zeitliche Aspekt getrennt betrachtet.

Die im Abschnitt 3.4.1 eingeführte Yeates-Dichte  $R$  ist ein globales Maß für die Verteilung der Punkte in der Ebene (im Raum). Zur Abschätzung der Vertrauenswürdigkeit einer aus unregelmäßig verteilten Stützpunkten interpolierten Oberfläche sind weitere Informationen über die lokale Lage und Verteilung der Stützstellen notwendig. Ausgehend vom Konfidenzbereich (Aussagebereich) einer Vermessung, die den Bereich beschreibt, in dem von den diskreten Stützstellen auf die Fläche geschlossen werden darf, können Konfidenzoberflächen definiert werden.

In Anlehnung an die Shepard-Interpolation kann von der Modellvorstellung ausgegangen werden, dass die Vertrauenswürdigkeit (Konfidenzmaß) am Ort des Stützwertes am größten ist. Dem Konfidenzmaß wird an dieser Stelle der Wert 1 zugeordnet. Mit zunehmendem Abstand zu den Stützstellen sinkt die Vertrauenswürdigkeit des interpolierten Wertes. Der Ort innerhalb des Konfidenzbereiches, der den größten Abstand von seiner nächsten Stützstelle hat erhält den Wert 0. Der Wert für jeden Gitterpunkt kann dann wie folgt bestimmt werden (in Anlehnung an [Ras98]):

$$V(p) := 1 - \frac{\min\{d(p, p^i)\}}{0.5 \cdot d_{\max}}$$

wobei  $d_{\max}$  der größte Abstand zweier Stützstellen ist.



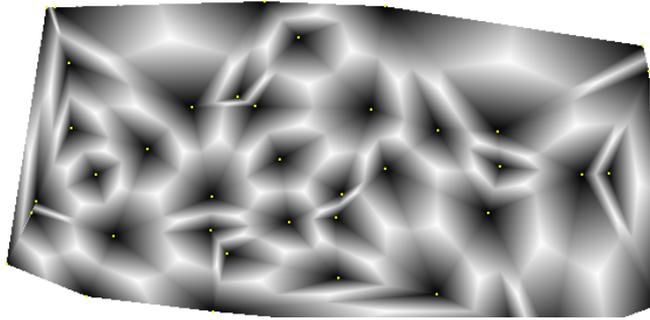
**Abbildung 4-33** Konfidenz-Maß einer unregelmäßigen Punktmenge bezüglich der Shepard-Interpolation

In Anlehnung an die Interpolation mit umgekehrten Abständen kann auch für die lineare Interpolation auf Dreiecken ein Vertrauenswert bestimmt werden. Hierfür wird eine Kombination der Gewichte der Interpolation verwendet. Bei der linearen Interpolation berechnen sich die Gewichte aus dem Verhältnis der Teilflächen zu der Gesamtfläche. Das Vertrauen ist am größten, wenn ein Punkt genau auf dem Eckpunkt des Elementes liegt und am geringsten wenn er im Schwerpunkt liegt. Somit berechnet sich das Konfidenzmaß wie folgt:

$$V(p) := \frac{3}{2} \cdot \left( \max_{i=1,2,3} \left\{ \frac{A_i}{A} \right\} - \frac{1}{3} \right)$$

#### 4.4 Bewertung der Interpolierten digitalen Bathymetrien, Fortsetzung

Die Abbildung 4-34 zeigt den Verlauf des Vertrauenswertes, wobei eine dunkle Färbung ein hohes Vertrauen bedeutet.



**Abbildung 4-34** Konfidenz-Maß einer unregelmäßigen Punktmenge bezüglich der linearen Interpolation auf Dreiecken

Auch für die zeitliche Komponente der Interpolation kann ein Vertrauenswert ermittelt werden. Für die Interpolation mit umgekehrten Abständen in der Zeit wurde der gleiche Ansatz, Verwendung des kleinsten Gewichtes, verwendet. Die Untersuchung zeigte aber, dass im Bereich von zeitlich dicht gemessenen Bereichen das Vertrauen niedriger ausfällt als bei dünn gemessenen Bereichen. Daher wurde versucht, den absoluten Abstand zu betrachten. Wird allerdings nur der absolute Abstand betrachtet so ist ein Vergleich mit anderen Analysen nur bedingt möglich. Daher wurde als Vertrauen das größte Gewicht in Bezug auf den Abstand verwendet. Diese Betrachtung liefert eine relative Verteilung, bei der auch in dicht gemessenen Gebieten Aussagen getroffen werden können.



**Abbildung 4-35** Vertrauensangaben für die Bathymetriesimulation am 01.01.2000 (weiß–geringes Vertrauen, schwarz–hohes Vertrauen)

Nach der Bewertung der einzelnen Komponenten der Interpolation in Raum und Zeit, wurde eine Vorgehensweise entwickelt, die eine gesamte Bewertung für die Interpolation ermöglicht. Liegen die einzelnen Bewertungen in der gleichen Skalierung vor, also z.B. als relative Verteilung, so können die Einzelergebnisse miteinander multipliziert werden und führen zu einer globalen Vertrauenswürdigkeit (Konfidenzmaß).

Für die kombinierten Verfahren, wie Zeit-Kugel oder Zeit-Kegel, kann die Vorgehensweise der Interpolation mit umgekehrten Abständen als Grundlage verwendet werden um die Vertrauenswürdigkeit zu bestimmen.

---

#### **4.4 Bewertung der Interpolierten digitalen Bathymetriem, Fortsetzung**

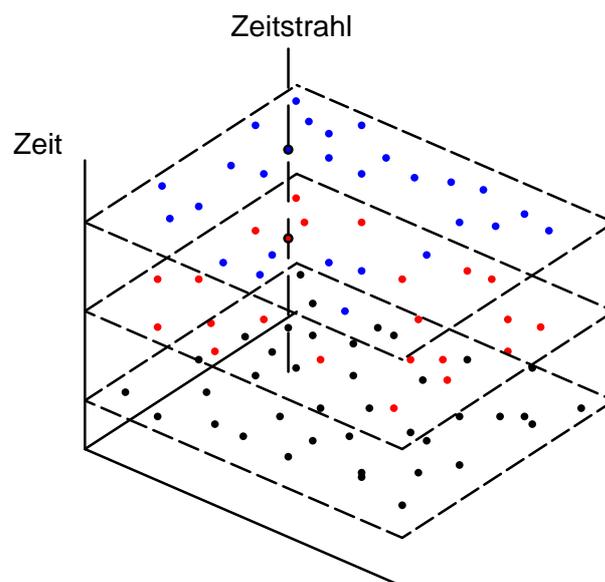
Allerdings muss hier noch genauer der Einfluss der Verknüpfung von Raum und Zeit, also der Geschwindigkeit, auf die Bewertung der Vertrauenswürdigkeit untersucht werden.

# Analysen auf den digitalen Bathymetrien

## 5

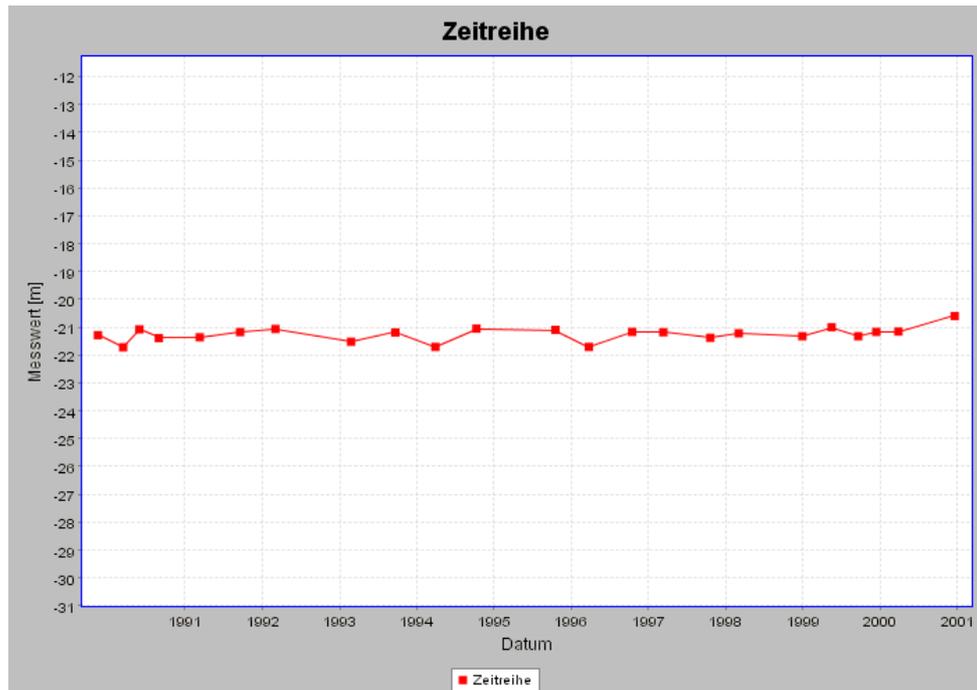
### 5.1 Zeitliche Analysen

Die entwickelten Verfahren der Bathymetriesimulation schaffen die Möglichkeit, an jedem Ort und zu jedem Zeitpunkt einen interpolierten Tiefenwert sowie eine Vertrauenswürdigkeit in Bezug zum Interpolationsverfahren zu ermitteln. Werden Tiefen zu verschiedenen Zeitpunkten ermittelt, so führt dies zu einer Zeitreihe für einen festen Punkt.



**Abbildung 5-1** Schematische Darstellung des Zeitstrahles

**Zeitreihe:** Als Stützstellen können sowohl eine äquidistante Zerlegung des Zeitintervalls als auch die Zeitpunkte gewählt werden, in dem der Zeitstrahl den Aussagebereich einer Messung durchstößt.



**Abbildung 5-2** Exemplarische Zeitreihe für einen Punkt im Projektgebiet

Die Auswertung der Zeitreihe an einem Ort eröffnet die Möglichkeit zur Bestimmung

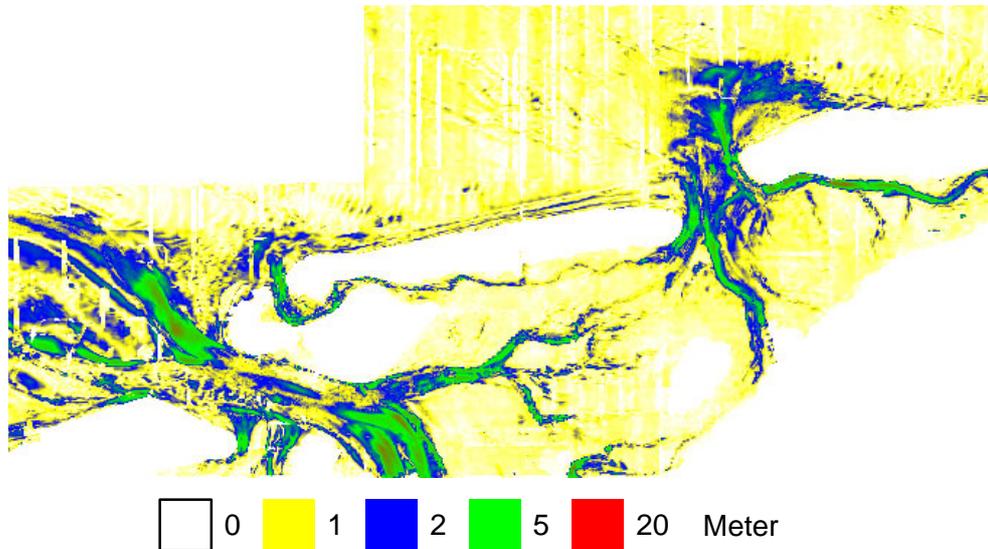
- der Anzahl der verschiedenen Messkampagnen,
- des minimalen/maximalen Tiefenwertes,
- des minimalen/maximalen Datums,
- der minimalen/maximalen Differenz zwischen zwei zeitlich benachbarten Messwerten,
- des minimalen/maximalen zeitlichen Abstandes zwischen zwei Messkampagnen,
- der mittleren Messhäufigkeit,
- der minimalen/maximalen Steigung zwischen zwei benachbarten Messwerten,
- von systematischen Ausreißern,
- des Datums des Minimums/Maximums.

Die dargestellten Analysen stellen nur Beispiele dar, weitere Analysen sind denkbar. Im Rahmen des Projektes KoDiBa wurden einige Auswertungen unter dem Aspekt der Fehleridentifikation und der Bestimmung morphologischer Geschwindigkeiten näher betrachtet.

### 5.1.1 Extremwertbestimmung

Untersucht man die Werte des Zeitstrahles, so kann das Minimum und das Maximum innerhalb des betrachteten Zeitraumes ermittelt werden. Die Differenz dieser beiden Werte ist ein Maß für die Veränderung innerhalb des

Betrachtungszeitraums. In Verbindung mit der Überdeckung können dann Bereiche mit großen morphologischen Veränderungen bestimmt werden.



**Abbildung 5-3** Differenz der Extremalwerte

Die Abbildung 5-3 zeigt die flächenhafte Verteilung der Differenzen der Extremalwerte im Projektgebiet. Hierzu wurde in jedem Punkt eines regulären Rasters eine Zeitreihe generiert und die zugehörigen Auswertungen durchgeführt. Es ist deutlich zu erkennen, dass in vielen Bereichen nur geringe Veränderungen (weniger als 1 Meter) vorliegen. In den Bereichen der Fahrwassers und Tiderinnen sind größere Differenzen erkennbar, die auf stärkere morphologischen Veränderungen hinweisen.

### 5.1.2 Tiefenänderungsrate

Als weiteres kann die Steigung innerhalb der Zeitreihe untersucht werden. Allgemein wird die Steigung als die Veränderung der Tiefenwerte in Bezug auf eine zeitliche Differenz definiert:

$$\text{Steigung} = \frac{\Delta z}{\Delta t}$$

Unterschiede in den Berechnungen ergeben sich durch die Wahl des betrachteten Zeitintervalle  $\Delta t$ .

Werden nur benachbarte Zeitpunkte und deren Tiefenwerte betrachtet so kann die maximale Veränderung, die zwischen zwei Vermessungen beobachtet wurde, bestimmt werden. Wird diese Betrachtung für das gesamte Untersuchungsgebiet durchgeführt, so ergibt sich die in Abbildung 5-4 dargestellte Verteilung.

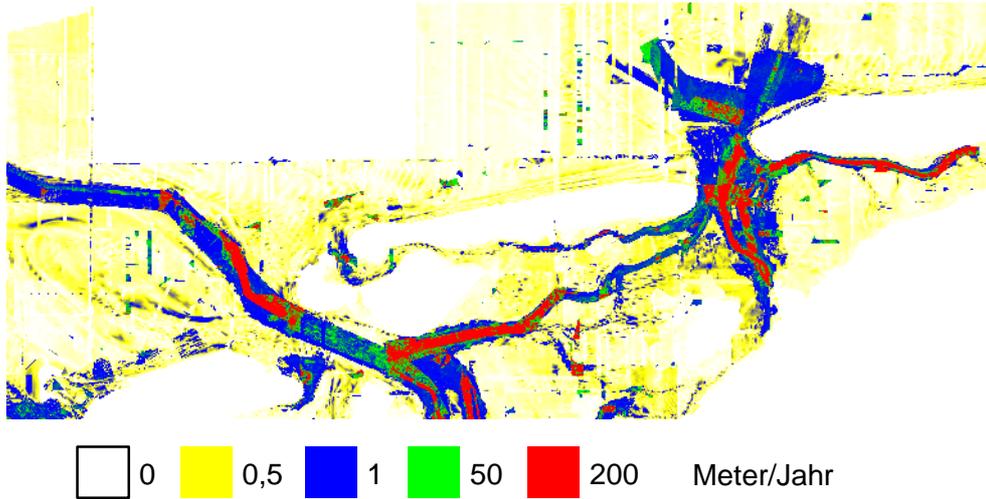


Abbildung 5-4 Ermittelte maximale Steigungen im Projektgebiet

Deutlich sind die Unterschiede in der Verteilung der Steigungen zu erkennen. Auffallend sind die starken Steigungen in der Umgebung der Fahrrinnen mit Werten von bis zu 200 m/Jahr. Ursachen solcher großen Werte sind sehr kurze Aufnahmeintervalle in Verbindung mit Messpositionen an den Rinnenkanten, wo kleine Änderungen in der horizontalen Positionsbestimmung vermutlich zu großen Tiefenänderungen führen. Beispielsweise führen bei Messungen im Abstand von nur wenigen Tagen schon geringe Messtoleranzen im Zentimeterbereich zu starken berechneten Steigungen.

Ein weiterer denkbarer Ansatz, um die Steigung zu ermitteln, wäre die Betrachtung der Extremwerte. So können die Extremwerte der Zeitreihe gesucht werden und dazu der zeitliche Abstand bestimmt werden. Die so ermittelte Steigung repräsentiert die mittlere maximale Änderungsrate an einem Ort über dem Betrachtungszeitraum.

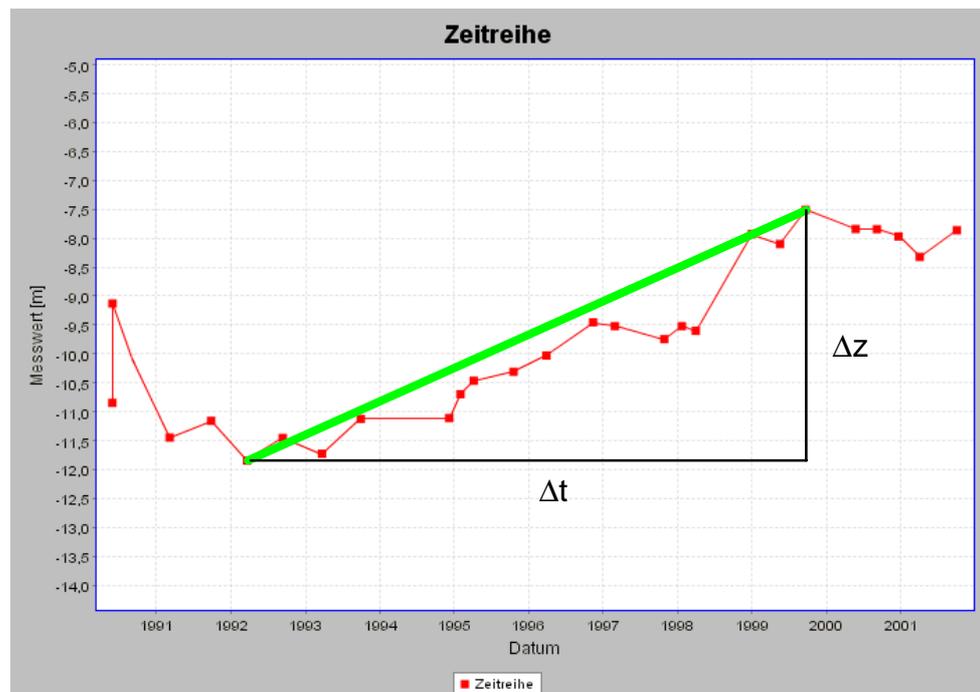
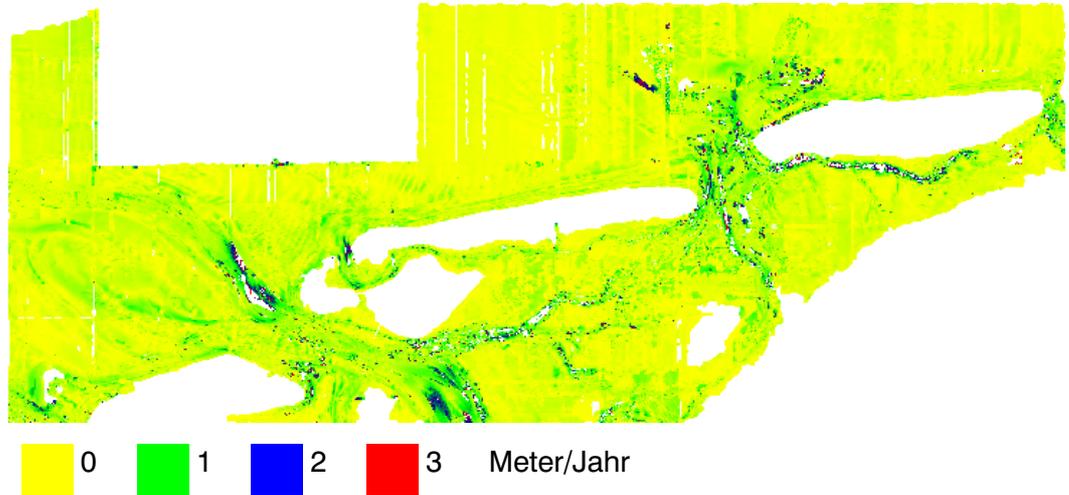


Abbildung 5-5 Ermittlung der Steigung für einen Punkt

Auch diese Änderungsraten lassen sich flächenhaft darstellen (siehe Abbildung 5-5). Gute erkennbar sind auch hier wieder die Tiderinnen als morphologisch aktive Bereiche. Zusätzlich sind aber auch die Bereiche der großen Sände und Sandbanken vor den Inseln als zeitlich veränderliche Strukturen zu erkennen.



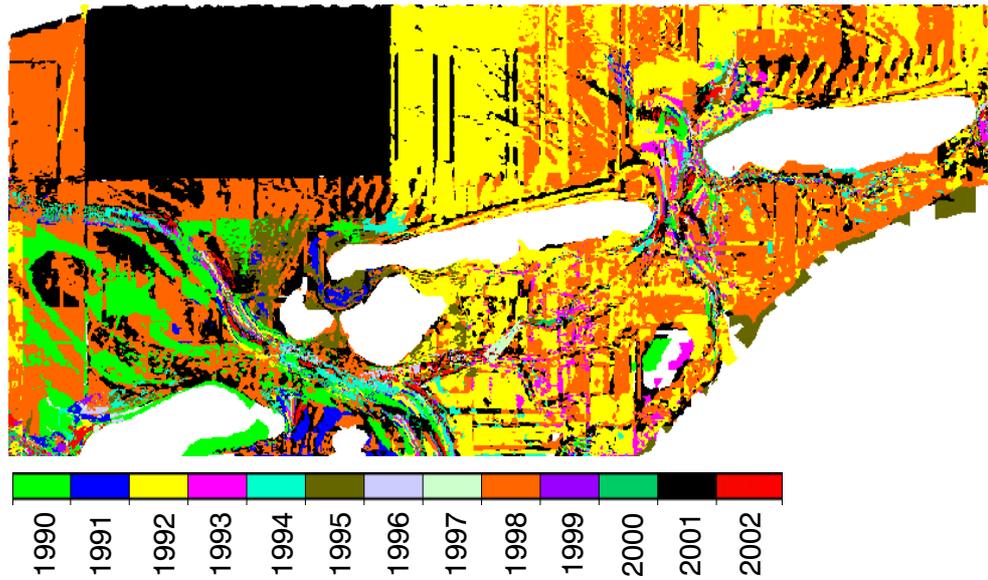
**Abbildung 5-6** mittlere Geschwindigkeit der Tiefenänderungen

Auch bei dieser Analyse ist noch eine starke Abhängigkeit vom Bodengradienten zu beobachten. Eine Skalierung der Änderungsraten mit dem Bodengradienten bzw. volumetrische Berechnungen führen zu einer weiteren Verbesserung der Aussagekraft der dargestellten Analysen.

### 5.1.3 Zeitpunkt des Minimums

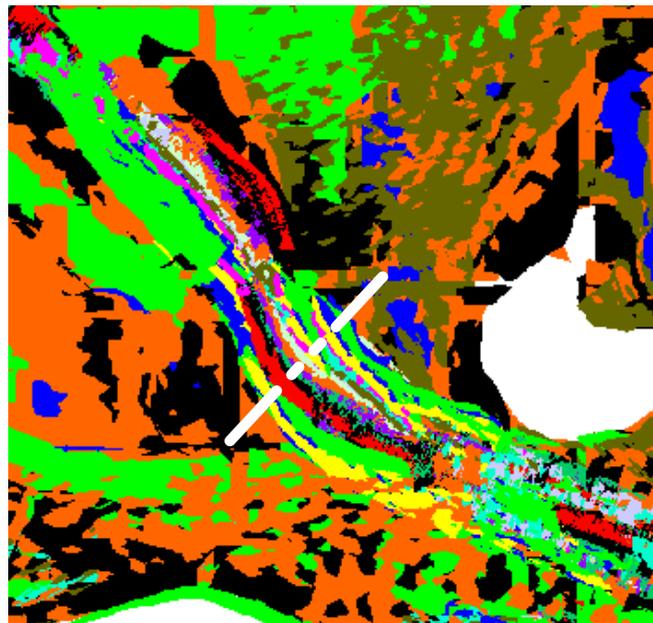
Bei den bisherigen Analysen wurden immer die Eigenschaften der Tiefenwerte in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Da aber Messwert und Datum streng miteinander verknüpft sind, kann auch ein anderer Ansatz verfolgt werden. So wird im Folgenden nach einer bestimmten Eigenschaft des Messwertes gesucht und das zugehörige Datum aufgetragen. Dieses Vorgehen soll am Beispiel des Minimums (der maximalen Tiefe) gezeigt werden.

Es wird über den gesamten Betrachtungszeitraum die größte Tiefe an einer Stelle gesucht. Ist dieser Wert gefunden, so wird das zugehörige Datum aufgetragen. In der Abbildung 5-7 wurden an jedem Punkt des Projektgebietes das Jahr farblich kodiert in dem die größte Tiefe angenommen wurde.



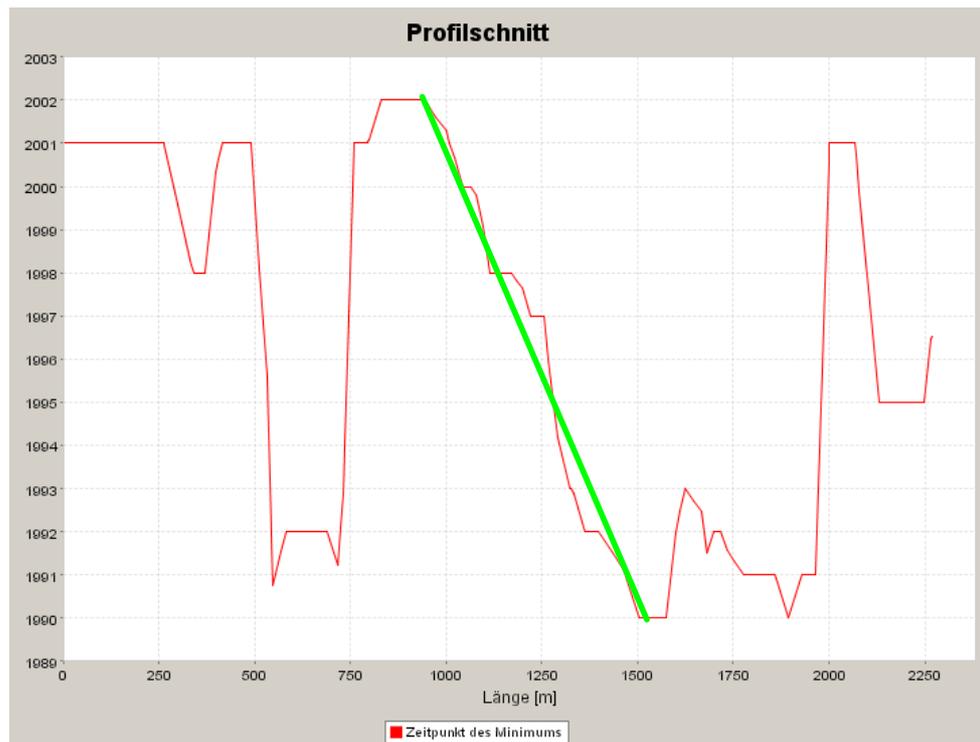
**Abbildung 5-7** Zeitpunkt des minimalsten Wertes

In der Abbildung 5-7 sind Strukturen erkennbar, die mit den bathymetrischen Gegebenheiten in Beziehung gesetzt werden können. In einigen Bereichen werden alle Minima innerhalb eines Jahres angenommen.



**Abbildung 5-8** Minima im Bereich der Fahrinnen

Innerhalb der Fahrrinne sind Streifen zu erkennen, die jeweils einem bestimmten Jahr entsprechen. Auffallend ist das kontinuierliche Wandern über die Jahre. Legt man einen Schnitt senkrecht zu den Streifen, so entsteht folgendes Diagramm (siehe Abbildung 5-9).



**Abbildung 5-9** Zeitpunkt des Minimums im Bereich der Fahrinnen in den Jahren 1990 bis 2003

Es ist deutlich zu sehen, wie sich mit der Laufcoordinate des Schnittes auch die Jahreszahlen verändern. Es zeichnet sich eine Entwicklung ab, aus der eine Geschwindigkeit der Verlagerung der Rinne abgeleitet werden kann.

## 5.2 Fehlerindikator in der Zeit

Mit der Betrachtung der Tiefenentwicklung über die Zeit stehen neue Möglichkeiten der Identifikation systematischer Fehler zur Verfügung. Hierbei werden die Vermessungsdaten nicht mehr nur in ihrer Einordnung innerhalb einer Messkampagne betrachtet, sondern in allen Messungen, die in der Nähe eines betrachteten Ortes zur Verfügung stehen.

Fehler und Inkonsistenzen in den Vermessungsdaten über die Zeit konnten mit den bisherigen Methoden der Einordnung von Messwerten in einer Messkampagne nicht ermittelt werden. Die bisherigen Methoden können Messfehler nur in ihrer Punktmenge aufspüren. Fehler außerhalb der Punktmenge bzw. Fehler, welche die gesamte Punktmenge betreffen, konnten kaum identifiziert werden. Solche Fehler können beispielsweise ihre Ursache in einem falschen Bezugsniveau oder in Prozessfehlern beispielsweise bei der Beschickung liegen. Punktmengen mit solchen Fehlern sind in sich konsistent. Erst durch den Vergleich der Punktmenge mit anderen Punktmengen ist eine Identifikation solcher Fehler möglich.

**Systematische Fehler:** Eine Möglichkeit der Identifikation systematischer Fehler ist das Markieren zeitlicher Ausreißer in der Zeitreihe der Tiefenentwicklung an einem Ort. Solche zeitlichen Ausreißer sind durch zwei Phänomene gekennzeichnet.

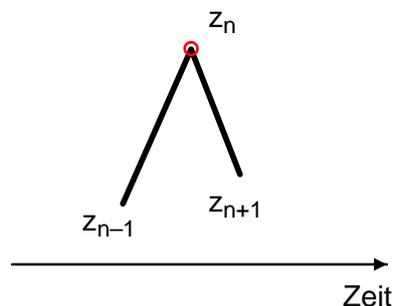
- Der Tiefenwert ist "sehr viel anders" als der vorherige und nachfolgende Tiefenwert.
- Der vorherige und der nachfolgende Tiefenwert haben die gleiche Größenordnung.

Als Testkriterien wurde

$$|z_n - z_{n-1}| \approx |z_{n+1} - z_n| > \text{Schwellenwert}$$

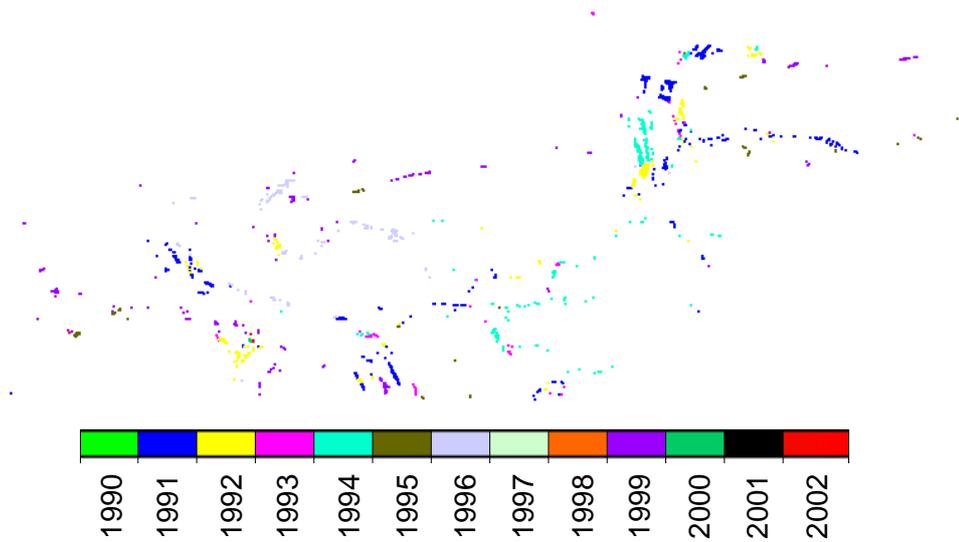
$$|z_{n+1} - z_{n-1}| \approx 0$$

verwendet.



**Abbildung 5-10** Graphische Beschreibung eines systematischen Fehlers

Werden die so bestimmten Ausreißer in der Fläche mit dem zugehörigen Datum der Messkampagne dargestellt so vereinfacht sich die Identifikation systematischer Fehler (siehe Abbildung 5-11).



**Abbildung 5-11** Graphische Beschreibung eines systematischen Fehlers

Deutlich zu erkennen sind sich herausbildende Flecken, die auf Vermessungen mit einem systematischen Fehler deuten. Es bleibt zu untersuchen, wie mit solchen Punktmengen zu verfahren ist.

Um das Forschungsprojekt KoDiBa und seine Ergebnisse dem interessierten Fachpublikum vorzustellen, wurde ein Prototyp eines Web-Portals entwickelt und implementiert ([www.kodiba.de](http://www.kodiba.de)). Während der Projektlaufzeit diente das Web-Portal als zentrale Kommunikationsplattform insbesondere für die Projektbegleitende Gruppe und die Projektpartner. Nach Abschluss des Projektes wird das Web-Portal in NOKIS++ integriert wo die wesentlichen Ergebnisse des Projektes dauerhaft dokumentiert werden. Neben dem Abschlussbericht werden in verschiedenen Web-Applikationen der Öffentlichkeit die entwickelten und implementierten Methoden für die Erstellung konsistenter digitaler Bathymetrien vorgestellt.

## 6.1 Inhalte

Für die Online-Präsentation des Projekts wurde ein Konzept entwickelt, welches es erlaubt, neben den Projektzielen und Ergebnissen in einer klassischen Form als statische Inhalte von Web-Seiten auch verschiedene Darstellungen der im Projekt entwickelten Methoden und Technologien zu realisieren. Neben dem öffentlich zugänglichen Bereichen besteht das KoDiBa-Web-Portal aus einem passwortgeschütztem internen Bereich, der während der Projektlaufzeit als Kommunikationsplattform fungierte. Im Folgenden werden nur die der Öffentlichkeit zugänglichen Bereiche dargestellt.

### 6.1.1 Statische Inhalte

Um den Nutzer einen schnellen Einstieg in die von KoDiBa bereitgestellten Informationen zu ermöglichen ist, die Startseite des Online-Auftrittes als statischer Inhalt realisiert. Unter dem Reiter Projekt wird über die Ziele und Partner des Projektes KoDiBa informiert. Unter dem Reiter Abschlussbericht ist dieser Abschlussbericht zu finden. Die Zwischenberichte als auch die Präsentationen und Protokolle der Projektgruppensitzungen sind über den internen Bereich des KoDiBa-Webservers zu verfügbar.

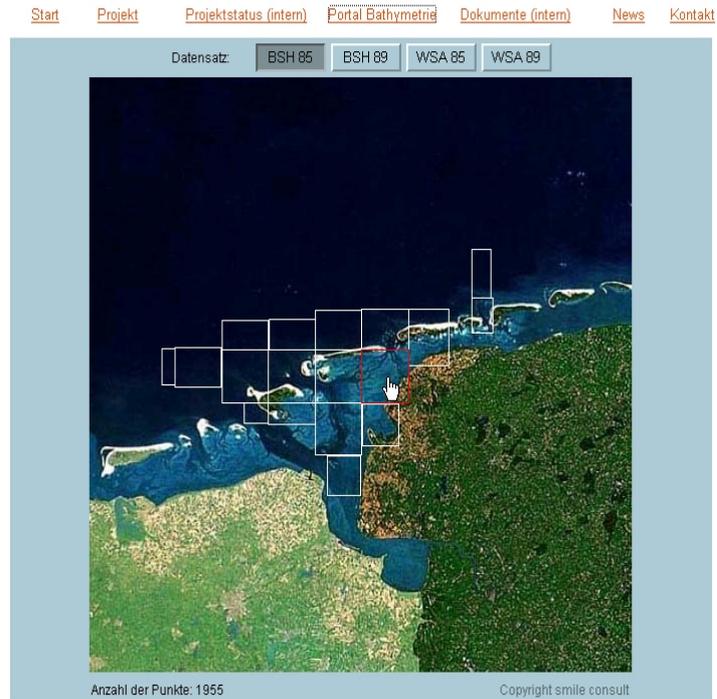


**Abbildung 6-1** Webseite des Projektes

Die Diskussionen mit der projektbegleitenden Gruppe haben aufgezeigt, dass die im Projekt genutzten Vermessungsdaten als sensibel eingestuft werden müssen und daher der Öffentlichkeit nicht direkt zugänglich gemacht werden sollten. Aus diesem Grunde wurde kein direkter Zugriff auf die Vermessungsdaten zugelassen sondern es wurde nur den in KoDiBa entwickelten Methoden die Nutzung der Daten erlaubt. Unter dem Reiter Webportale auf der Startseite der KoDiBa-Web-Seite werden unterschiedliche Sichten auf die zugrundeliegenden Vermessungsdaten und zugehörigen Metadaten gegeben.

### 6.1.2 Ansicht der bathymetrische Vermessungsdaten

Das Portal Bathymetrie entstand in der Anfangsphase des Projektes. Es stellt die Messdaten des BSH und des WSA Emden aus den Jahren 1985 und 1989 dar. Das Portal wurde mit der Applet-Technologie umgesetzt. Vom Server wird ein Viewer an den Client übertragen. In diesem Viewer können die verschiedenen Datensätze interaktiv ausgewählt werden. Nach der Auswahl des Datensatzes werden die Vermessungsdaten binär vom Server an den Java-Client übertragen und dort ingenieurgerecht dargestellt.



**Abbildung 6-2** Portal Bathymetrie mit ingenieurgerechter Visualisierung

### 6.1.3 Metadaten-Viewer

Der Metadaten-Viewer ermöglicht es, eine Übersicht über die im Projekt-Gebiet zur Verfügung stehenden Vermessungsdaten zu geben. Er entstand in der zweiten Hälfte der Projektlaufzeit. Als Technik wird hier eine Kombination aus Java-Server-Pages und Servlets verwendet. Dadurch werden HTML-Seiten generiert, so dass auf der Seite des Klienten nur ein einfacher Browser vorhanden sein muss.

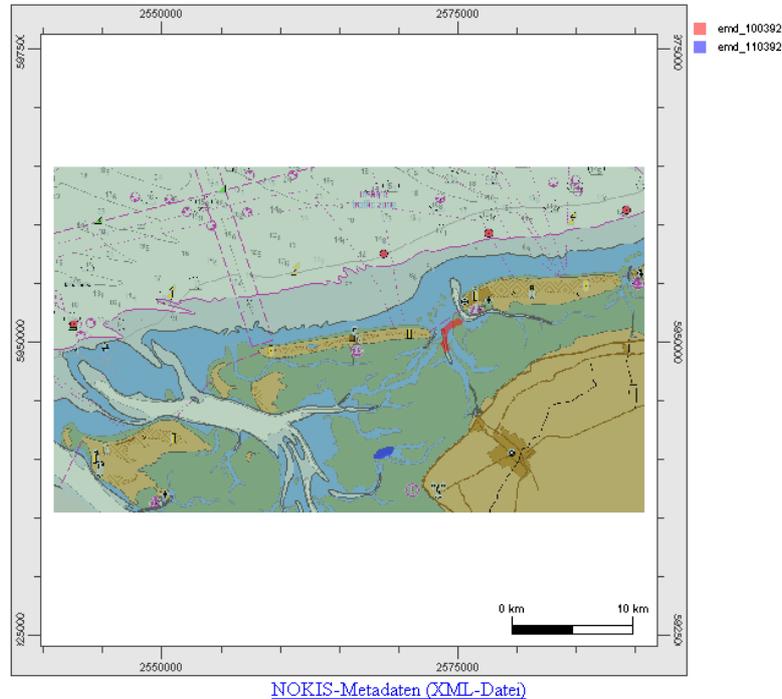
Die Auswahl erfolgt über die Metadaten der einzelnen Datensätze. Diese werden aktuell aus der zugrundeliegenden Datenbank extrahiert. Ist die Auswahl erfolgt, wird serverseitig ein Bild der beschreibenden Metadaten erzeugt und innerhalb einer einfachen HTML-Seite auf dem Klienten dargestellt.

[Start](#)   [Projekt](#)   [Projektstatus \(intern\)](#)   [Web-Portale](#)   [Dokumente \(intern\)](#)   [News](#)   [Kontakt](#)

Metadaten-Viewer für die Bathymetriedaten des Forschungsprojekt KoDiBa  
(Entwicklung und Implementierung von Werkzeugen zur Erstellung konsistenter Digitaler Bathymetrien)

[Informationen über das Projekt](#) - [Nachricht an den Administrator](#) - [smile consult GmbH](#)

Darstellung der Umrandungspolygone der auf der vorherigen Seite ausgewählten Datensätze.  
Die Bezeichnung der Datensätze erfolgt nach dem Muster "Quelle\_TagMonatJahr".



Copyright © 2002  
smile consult GmbH  
Alle Rechte vorbehalten

letzte Änderung 14.02.2003  
[Webmaster](#)

**smile:**  
consult

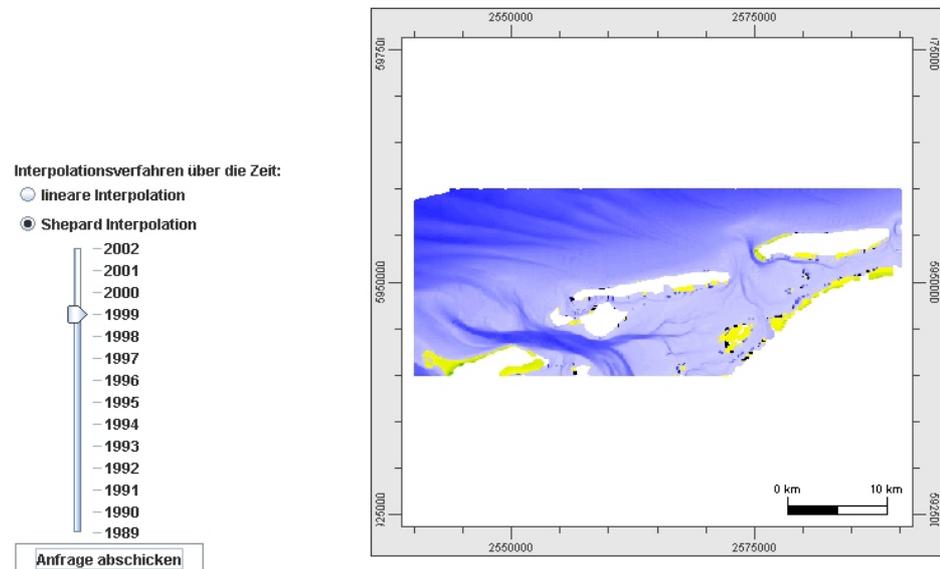
**Abbildung 6-3** Darstellung der ausgewählten Metadaten

### 6.1.4 Bathymetriesimulation

Der Bathymetriegenerator erstellt aus den vorhandenen Datensätzen eine Bathymetriesimulation zu einem bestimmten Zeitpunkt. Grundlage für die Erstellung einer Bathymetriesimulation, einer quasi-konsistenten digitalen Bathymetrie zu einem bestimmten Zeitpunkt, sind die im Projekt KoDiBa entwickelten Interpolationsmethoden in Raum und Zeit, sowie die im reversiblen Datenmodell zusammengefassten Vermessungsdaten vom BSH und vom WSA Emden. Im Rahmen des Web-Portals wird ein reguläres Raster zur Berechnung und Darstellung der berechneten Tiefenverteilung verwendet. Zu Berechnung der Tiefenverteilung kann aus drei im Projekt implementierten Interpolationsmethoden gewählt werden.

Als Darstellungstechnologie wird eine Kombination aus Applet- und Servlet-Technologie verwendet. Dieser Ansatz bietet die größtmögliche Flexibilität. Vom Server wird ein Darstellungsapplet an den Klienten übertragen. Die Applet-Technologie lässt eine interaktive Auswahl zu. Die ausgewählten Parameter werden an den Server übertragen und in einem Servlet

ausgewertet. Das Servlet generiert aus den Parametern eine Bathymetrie-simulation. Die Daten der generierten Bathymetriesimulation werden binär an den Klienten geschickt und von diesem innerhalb der Zeichenfläche dargestellt. Veränderungen in der Darstellung (Zoomen, etc.) werden nur vom Klienten verarbeitet, so dass der Server andere Anfragen verarbeiten kann.



**Abbildung 6-4** Schieberegler zur Auswahl des Zeitpunktes und Ergebnis der Bathymetriesimulation

### 6.1.5 Animation der Tiefenentwicklung

Die Animation der Bathymetriesimulation erzeugt aus allen Bathymetrie-simulationen einen zeitlichen Ablauf. Das Tool entstand aufbauend auf dem Bathymetriegenerator. Für die Erstellung einer Animation der Bathymetrie-simulation wird die gleiche Methodik verwendet.

## Animation der Morphodynamik

Bitte geben sie Anfangs-, Enddatum und die Schrittweite an:

Anfangsdatum:

Tag:  Monat:  Jahr:

Enddatum:

Tag:  Monat:  Jahr:

Schrittweite:

Tag:  Monat:  Jahr:

Wählen sie das Interpolationsverfahren:

- linear Interpolation
- Shepard-Interpolation
- Aufprägen
- Mix-Interpolation

**Abbildung 6-5** Eingabemaske für die Animation

Der Benutzer muss über ein Eingabefeld das Start- und Enddatum, sowie den gewünschten Abstand und die Interpolationsmethode bestimmen. Der Server berechnet für die erforderlichen Zeitpunkte quasi-konsistente digitale Bathymetrien. Mit Hilfe einer Abbildungsvorschrift wird aus jeder Bathymetriesimulation ein Bild erstellt. Alle Bilder werden zu einem animierten GIF kombiniert, welches an den Klienten übertragen und dort dargestellt wird.

Aufgrund der derzeitigen Server-Kapazität kann ein GIF nur aus maximal 40 Bathymetrien bestehen.

## 6.2 Technische Umsetzung

Wie im letzten Abschnitt dargestellt erfolgt die Präsentation der Ergebnisse in verschiedene Formen über ein Web-Portal. Zu Beginn des Projektes wurde ein Server (Blade 2000) der Firma SUN Microsystems beschafft. Durch die 64-Bit Rechnerarchitektur ist dieses 64-Bit System vor allem für die Verwaltung und Verarbeitung großer Datenmengen geeignet. Sowohl das eingesetzte Betriebssystem Solaris 9 als auch die mitgelieferte Softwareumgebung zur Erstellung von Web-Applikationen hat den Aufbau des Web-Portals unterstützt und zu einem zuverlässigen Betrieb während der Projektlaufzeit geführt.

### 6.2.1 Konzept

Um eine möglichst große Flexibilität bei der Implementierung und späteren Nutzung des Web-Portals zu erreichen wurde ein mehrschichtiges Implementierungskonzept gewählt. Die Umsetzung in Form einer 3-Schichten-Architektur, wie sie vom American National Standard Institute (ANSI) vorgeschlagen wird, sieht eine Trennung zwischen Daten, Anwendungen und Präsentation vor. Jede dieser Ebenen kann selbst weiter strukturiert sein.

Im Datenlayer erfolgt die physische Datenorganisation auf der Basis des entwickelten reversiblen Datenmodells. Als Datenbankmanagementsystem kommt das Open-Source-Produkt MySQL zum Einsatz.

Der Applikationslayer ist Träger sämtlicher Anwendungen. Sofern notwendig, werden im Applikationslayer die Daten und Metadaten des Datenlayers verarbeitet und so aufbereitet, dass diese im Präsentationslayer dargestellt werden können. Auf dieser Ebene werden die im Projekt entwickelten Interpolations- und Analysemethoden ausgeführt.

Der Präsentationslayer bildet die graphisch geführte Benutzeroberfläche. Dieser Layer ist die einzige Schicht, mit welcher der Benutzer in direkten Kontakt tritt. Sie kann als Sicht einzelner Anwendungsprogramme oder Benutzergruppen auf die Datengrundlage verstanden werden. So können verschiedene Sichten definiert werden, die alle auf der gleichen Grundgesamtheit beruhen.

### 6.2.2 Datenmanagement

Voraussetzung für die Erstellung digitaler Bathymetrien ist die effiziente Nutzung großer Mengen von Vermessungsdaten. Das Speichern und das Management der Vermessungsdaten wird von einer Datenbank übernommen. Die Open-Source-Datenbank ermöglicht den Zugriff sowohl über entsprechende Managementapplikationen als auch über eine standardisierte JDBC-Schnittstelle mit Java. In der Projekt-Datenbank werden sowohl die eigentlichen Vermessungsdaten als auch die zugehörigen Metadaten gespeichert. In Verbindung mit entsprechenden im Projekt implementierten Java-Packages bildet die MySQL-Datenbank die Datenbasis sowohl für die Erzeugung quasi-konsistenter digitaler Bathymetrien als auch für die Darstellung im Web-Portal. Hierbei muss besonders darauf hingewiesen werden, dass in der Projektdatenbank nicht nur die eigentlichen Vermessungen sondern auch die zugehörigen Metadaten strukturiert abgelegt worden sind. Entsprechend dem reversiblen Datenmodell erfolgt ein effizienter Zugriff auf die Vermessungsdaten immer über die zugehörigen Metadaten.

### 6.2.3 Anwendungslayer

Im Anwendungslayer werden alle wesentlichen Operation durchgeführt. Die Implementierung, der im Anwendungslayer realisierten Softwaremethoden basieren auf gemeinsam genutzten Java-Packages. Mit den von der Firma Sun Microsystem entwickelten Java-Technologien der Java-Servlets und Java-Server-Pages stehen Softwarekomponenten für den Aufbau von serverseitigen Anwendungen und Web-Services zur Verfügung.

Aufbauend auf den im Projekt KoDiBa entwickelten und implementierten Methoden zur Interpolation in Raum und Zeit, wurden verschiedene Anwendungen implementiert, die ihre Ergebnisse über den Präsentationslayer des Web-Portals den Nutzern präsentieren.

### 6.2.4 Präsentationslayer

Der Präsentationlayer bildet die eigentliche Benutzerschnittstelle. Sie ermöglicht sowohl die Eingabe von Nutzerdaten und somit die Kommunikation mit dem Applikations-Server als auch die Darstellung der Ergebnisse des Applikations-Servers.

### 6.2.5 Prozessketten

Nach der Beschreibung der Hard- und Softwaretechnik soll im Folgenden die Prozesskette der Anfragenverarbeitung und -auswertung geschildert werden. Prinzipiell können drei grundlegende Verarbeitungsstrategien definiert werden. Die erste Strategie sieht die Bereitstellung vordefinierter Inhalte vor. Bei der zweiten Strategie werden zur Laufzeit serverseitig die Daten verarbeitet. Die letzte Vorgehensweise sieht die Verarbeitung der Daten auf der Seite des Klienten vor. Auf die Vor- und Nachteile der einzelnen Bearbeitungsschritte soll nachfolgend eingegangen werden.

#### Statische Inhalte

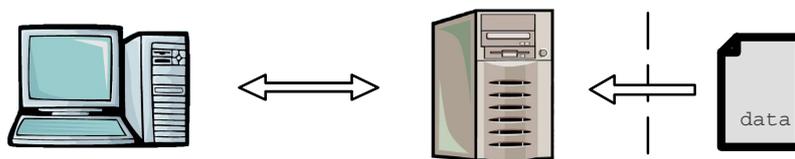


Abbildung 6-6 Prinzip der Bereitstellung von vordefiniertem Inhalt

Vordefinierte Inhalte werden zu einem Zeitpunkt vor der Aktivierung des Web-Dienstes in Form von Bildern und HTML-Seiten bereitgestellt. Dabei werden sämtliche Darstellungen (HTML-Seiten, Bilder) offline erstellt und für vordefinierte Anfragen bereitgestellt. Der Vorteil dieses Vorgehens ist die relativ geringe Datenübertragung und schnelle Verarbeitungszeit. Da bei einer Anfrage schon die Ergebnisse vorliegen, benötigt diese Methode keine aufwendigen Rechenzeiten. Als Nachteil ist auf jeden Fall der fest definierte Informationsgehalt zu nennen. So müssen bei Änderungen der Informationen die Daten offline neu erstellt und dann erneut bereitgestellt werden.

#### Serverseitige Verarbeitung

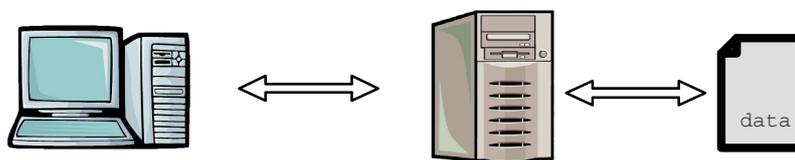


Abbildung 6-7 Prinzip der serverseitigen Verarbeitung

Flexibilität in der Darstellung erreicht man, wenn die Daten zur Laufzeit verarbeitet werden. Das bedeutet, dass keine festen vordefinierten Seiten existieren, sondern der Server auf Anfragen eines Klienten direkt reagieren muss. Ein Beispiel für dieses Vorgehen ist die Servlet-Technologie. Dabei wird auf dem Server ein Programm gestartet, welches die Anfragen eines Klienten verarbeitet. In einem Servlet werden dann die Anfrageparameter

des Klienten verarbeitet. Je nach verwendeten Parametern wird dann online eine neue Web-Seite erstellt und an den Klienten zurückgesendet.

Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist der hohe Rechenaufwand des Servers. So muss bei jeder Anfrage eine neue Seite generiert werden. Dieser Vorgang verbraucht Rechenzeit. Je nach Anfrage ist die Rechenzeit unterschiedlich. Bei aufwendigen Prozessen, wie z.B. der Erstellung einer Bathymetriesimulation kann die Rechenzeit auch im Minutenbereich liegen. Die Belastung des Servers ist ein wichtiger Punkt, der nicht außer Acht gelassen werden darf. Ist die Serverlast zu groß, so kann das Online-Angebot nur noch eingeschränkt verwendet werden.

### Klientenseitige Verarbeitung



**Abbildung 6-8** Prinzip der Klientenseitigen Verarbeitung

Die dritte Möglichkeit ist die Klientenseitige Verarbeitung der Daten. Dabei werden die Rechenoperationen nicht auf dem Server durchgeführt, sondern auf dem Klienten. So kann die Rechenzeit auf dem Server sehr stark minimiert werden. Der Nachteil dieser Methode ist allerdings, dass an den Klienten die kompletten Rohdaten, sowie die Methoden übertragen werden müssen. Dies bedeutet ein sehr großes Datenvolumen, was gleichzeitig eine hohe Übertragungsdauer bedingt. Der Vorteil dieser Methode ist, dass nach der Übertragung aller Daten und Methoden an den Klienten, sehr schnell Veränderungen in den Anfragen verarbeitet werden können.

### Kombinierte Verarbeitung

Die vorgestellten Methoden zeigen drei Möglichkeiten auf, wie Anfragen von einem Klienten an einen Web-Server verarbeitet werden können. Für einen leistungsfähigen Web-Server ist eine Verknüpfung der drei Methoden die sinnvollste Lösung. So kann einerseits die Flexibilität der Anfragen gewährleistet werden, während zugleich die Rechenzeiten und Übertragungsmengen minimiert werden können.

#### 6.2.6 Integration in NOKIS++

Um die Präsentation der Ergebnisse auch nach Ablauf der Projektlaufzeit zu sicher zu stellen, wird die Web-Seite über das KFKI in den Server von NOKIS++ integriert. Dazu mussten die Web-Seiten angepasst werden und auf den NOKIS-Server übertragen werden. Bei der Übertragung des Web-Servers wurden nicht nur die statischen Web-Seiten, sondern auch die Datenbank mit dem reversiblen Datenmodell und die implementierten Methoden übertragen.

---

# Fazit und Ausblick



Das Projekt KoDiBa ist mit der Zielsetzung gestartet, Methoden zu entwickeln und zu implementieren, die die Möglichkeit eröffnen, konsistente digitale Bathymetrien zu generieren, die auf Vermessungsdaten basieren, die zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommen wurden.

Trotz erheblicher Anfangsschwierigkeiten bei der Zusammenstellung der für das Projektgebiet relevanten Vermessungsdaten, konnten zum Abschluss der Projektlaufzeit in eindrucksvoller Art und Weise die Möglichkeiten aufgezeigt werden, automatisiert konsistente digitale Bathymetrien aus Vermessungsdaten unterschiedlicher Herkunft zu erzeugen. Eine zentrale Bedeutung kommt bei diesem Prozess nicht nur der Qualität der Vermessungsdaten sondern insbesondere auch der zugehörigen Metadaten zu. Als Metadatenstandard kam das in NOKIS entwickelte ISO19115-konforme Format zum Einsatz. Somit ist sichergestellt worden, dass die im Rahmen von KoDiBa generierten Metadaten in NOKIS integriert werden können und somit auch in Zukunft die aufbereiteten Vermessungsdaten des Projektgebietes im Rahmen von weiteren Forschungsprojekten zur Verfügung stehen.

Mit der Entwicklung des reversiblen Datenmodells und der damit verbundenen datenbankgestützten Speicherung konnte erstmals eine Vorgehensweise entwickelt werden, die die Möglichkeit bietet, zu jedem beliebigen Zeitpunkt die durchgeführten Bearbeitungsschritte nachzuvollziehen oder sogar rückgängig zu machen. Die datenbankgestützte Speicherung der Vermessungsdaten und Metadaten stellt deren Konsistenz zu jedem Zeitpunkt sicher.

Die konsequente Betrachtung von Vermessungsdaten und Metadaten als Einheit eröffnete neue Analysemöglichkeiten. So wurden Analysen entwickelt die ausschließlich auf den Metadaten beruhen. Auch konnte der Zugriff auf die eigentlichen Vermessungsdaten wesentlich vereinfacht und effizient gestaltet werden.

Im Rahmen der Projektlaufzeit hat sich herausgestellt, dass der Aussagebereich einer Vermessung eine wesentliche Metainformation darstellt. In enger Zusammenarbeit mit dem Projekt NOKIS wurde der dort verwendete Metadatenstandard um den Aussagebereich einer Vermessung erweitert.

Die Erstellung konsistenter digitaler Bathymetrien zu einem festgelegten Zeitpunkt erforderte die Entwicklung von Interpolationsverfahren, die neben der örtlichen Verteilung der Vermessungsdaten auch den Zeitpunkt ihrer Aufnahme berücksichtigen. Die entwickelten Interpolationsverfahren lassen

---

sich in zwei Kategorien, den getrennten und kombinierten Verfahren, unterteilen. Schon mit der Klasse der Interpolationsmethoden mit Trennung von Raum und Zeit konnten beeindruckende Ergebnisse bei der Interpolation konsistenter digitaler Bathymetrien erzielt werden. Die Berücksichtigung physikalischer Prozesseigenschaften konnte durch die Entwicklung von kombinierten Interpretationsverfahren in Raum und Zeit erreicht werden. Hierbei hat sich die zu verwendende systemeigene Geschwindigkeit (morphodynamische Geschwindigkeit) als eine wesentliche Größe herausgestellt. Im Forschungsprojekt KoDiBa konnten erste Ansätze entwickelt werden, solche morphodynamischen Geschwindigkeiten auf der Basis der zur Verfügung stehenden Vermessungsdaten zu identifizieren. Dies ist zur Zeit jedoch nur in Bereichen möglich, in denen sich gut identifizierbare morphologische Strukturen verlagern. Eine flächenhafte Bestimmung solcher morphologischen Geschwindigkeiten ist zur Zeit noch nicht möglich, beeinflusst jedoch stark die Qualität der koppelten Interpolationen. Hier besteht ein großer Forschungsbedarf für die Zukunft.

Die im Forschungsprojekt KoDiBa entwickelte Modellvorstellung eines digitalen Geländemodells als Gesamtheit aller zur Verfügung stehenden Vermessungsdaten und zugehörigen Metadaten in Verbindung mit einer Methodendatenbank, in der geeignete Interpretationsvorschriften (Interpolations- und Approximationsverfahren) kodiert sind, ist auf großes nationales und internationales Interesse gestoßen. Die Diskussionen mit den Vertretern der projektbegleitenden Gruppe, den Projektpartnern als auch mit Kunden des Auftragnehmers aus dem internationalen Umfeld, zeigen nicht nur das Interesse sondern auch den Bedarf an den im Projekt KoDiBa durchgeführten Untersuchungen auf.

Der Prototyp eines Web-Portals [<http://www.kodiba.de>] diente während der Projektlaufzeit als zentrale Kommunikationsplattform und wird auch nach Ablauf des Projektes die Projektergebnisse der interessierten Öffentlichkeit vorstellen, indem es in das Nord-Ostsee-Küsteninformations-System (NOKIS) integriert wird.

---

# Literaturverzeichnis

- [AbM91]** Abramowski, S., Müller, H.: Geometrisches Modellieren, Reihe Informatik, Band 75. BI Wissenschaftsverlag, 1991.
- [Aur91]** Aurenhammer F.: Voronoi Diagrams – A Survey of a Fundamental Geometric Data Structure. ACM Computing Surveys. 23(3): S. 345–405 (1991)
- [Bar00]** Bartelme, N.: Geoinformatik - Modelle, Strukturen, Funktionen. Springer Verlag, Berlin, 2000
- [Bro95]** Bronstein, I.N.m Semendjajew G.M.: Taschenbuch der Mathematik. Harri Deutsch Verlag, 1995
- [Bur86]** Burrough, P.A., McDonnell R.A.: Principles of Geographical Information Systems, Oxford University Press, 1986
- [Bow81]** Bowyer, A.: Computing Dirichlet Tesselations. Computation Journal, 24, 1981.
- [EKS83]** Edelsbrunner, H., Kirkpatrick, D. G., Seidel, R.: On the Shape of a Set of Points in the Plane. In: IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 29, No. 4, S.551–559, 1983.
- [GaH97]** Garland, M., Heckbert, P. S.: Fast Triangular Approximation of Terrains and Height Fields, Computer Science Department, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 1997.
- [HoL92]** Hoscheck, J., Lasser, D.: Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung. Teubner Verlag, Stuttgart, 1992
- [Kin03]** Kinkeldey, C.: Digitale Geländemodellierung unter Berücksichtigung von Raum und Zeit, Studienarbeit, Institut für Bauinformatik, Universität Hannover, 2003 (nicht veröffentlicht)
- [Kof03]** Kofler, M.: MySQL – Einführung, Programmierung, Referenz, Addison-Wesley, 2003
- [Kol00]** Kolesnikov, N.: Ermittlung und Nutzung von Strukturinformationen für die Auswahl der Gradienten zur Erfassung der räumlichen Veränderlichkeit einer Fläche, In: Angewandte Geostatistik im Bergbau, Geologie, Geophysik, Geodäsie und Umweltschutz, Dresden, 2000
- [Kue98]** Jürges, J.: BAW–AK–Dateikennblatt: kuedat.dat (Kuefo-Format), Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg, 1998
- [MBS02]** unbekannt: Metadaten für das Peilwesen, Beschreibung des MBES-Formates, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz und Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest, Aurich, 2002
- [Mil01]** Milbradt, P.: Algorithmische Geometrie in der Bauinformatik, Habilitationsschrift, Institut für Bauinformatik, Universität Hannover, 2001

- 
- [Ras98] Rase, W.D.: Visualisierung von Planungsinformationen, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Heft 89,
- [Sel02] Sellerhoff, F.: Ein punktbasiertes Informationsmodell für das Küsteningenieurwesen, Dissertation, Institut für Bauinformatik, Universität Hannover, 2002
- [Wir99] Wirth, H.: Flächenhafte Plausibilisierung von Peildaten, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 1999
- [Yea68] Yeates, M.: An introduction to quantitative analysis in Economic Geography. McGraw-Hill, New York, 1968.

## 8.1 Elektronische Medien

- [WSV04] [http://www.wsv.de/Wir\\_ueber\\_uns/Leistungen/Vermessung\\_Kartenwesen\\_Liegenschaften/Vermessung\\_Kartenwesen\\_Liegenschaften.html](http://www.wsv.de/Wir_ueber_uns/Leistungen/Vermessung_Kartenwesen_Liegenschaften/Vermessung_Kartenwesen_Liegenschaften.html)
- [WSAEmd04] <http://www.wsa-emden.de>
- [odmg] Object Data Management Group :  
<http://www.odmg.org>
- [opengis] OpenGIS-Konsortium :  
<http://www.opengis.org>
- [sdts] Spatial Data Transfer Standard :  
<http://mcmcweb.er.usgs.gov/sdts>