



**Identifikation morphologischer  
Tendenzen und  
Geschwindigkeiten im  
Küstennahbereich  
(ImTG)**

**Abschlussbericht**

01.10.2006 – 31.09.2009

Institut für Bauinformatik  
Leibniz Universität Hannover



Vorhabensbezeichnung: ImTG - Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten im Küstennahbereich

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMBF) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Förderkennzeichen: 03 KIS 059

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2006 – 30.09.2009

Berichtszeitraum: 01.10.2006 – 30.09.2009

Zahlungsempfänger: Institut für Bauinformatik  
Leibniz Universität Hannover  
Callinstrasse 34  
30167 Hannover

Hannover, den 30.10.2009 PD Dr.-Ing. habil. Peter Milbradt  
M.Sc. Catrin Dorow  
Dipl.-Inf. Christian Asche

### Danksagung

Das Projekt ImTG wurde im Bereich des KFKI vom BMBF für einen Zeitraum von 3 Jahren gefördert und durch die projektbegleitende Gruppe des KFKI begleitet. Für die Finanzierung und Unterstützung möchten wir uns bei allen beteiligten ganz herzlich bedanken.

Ebenso möchten wir an dieser Stelle Sandra Burg (NLWKN), Holger Blum (NLWKN), Andreas Plüß (BAW-DH), Lutz Christiansen (LKN) und Lars Tiepolt (StAUN) danken, welche als Mitarbeiter der am Projekt beteiligten Dienststellen ihren Beitrag zum Gelingen des Projektes geleistet haben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
1.1	Projektpartner	2
1.2	Projektablauf und -schwerpunkte	2
<b>2</b>	<b>Projektgebiete</b>	<b>4</b>
2.1	Projektgebiet Ostfriesische Inseln	4
2.1.1	Langeoog	5
2.1.2	Juist	6
2.1.3	Anthropogene Eingriffe	6
2.2	Projektgebiet Dithmarscher Bucht	7
2.2.1	Anthropogene Eingriffe	8
2.3	Projektgebiet Elbeästuar	9
2.3.1	Anthropogene Eingriffe	10
2.4	Projektgebiet Rostock bis zum Darß	11
2.4.1	Ortslage Markgrafenheide	12
2.4.2	Anthropogene Eingriffe	13
<b>3</b>	<b>Datengrundlage</b>	<b>15</b>
3.1	Datenquellen	15
3.2	Daten für Seevermessungen	15
3.2.1	Datenstruktur	16
3.3	Daten für anthropogene Eingriffe / Bauwerksdaten	17
3.4	Metadaten	18
3.5	Berücksichtigte Daten	19
<b>4</b>	<b>Datenaufbereitung</b>	<b>22</b>
4.1	Validierung und Plausibilisierung	22
4.1.1	Metadaten	22
4.1.2	Vermessungsdaten	23
4.2	Automatische Strukturerkennung und -rekonstruktion	28
4.2.1	Nachbarschaften	29
4.2.2	Linienerkennung	30
4.2.3	Erkennen von regulären Rastern	35
<b>5</b>	<b>Datenmanagement und Implementierung</b>	<b>38</b>
5.1	Objektorientiertes Datenmodell	38
5.2	Verwaltung großer Datenmengen	40
5.2.1	Gitter-basierte Indizierung	40
5.2.2	Quadtree-basierte Indizierung	41
5.2.3	Indizierung über Metadaten	43
5.3	Objektorientierte Datenbank Db4o	43
5.4	Verwaltung allgemein georeferenzierter Objekte	44
5.4.1	Klassenmodell zur Datenverwaltung	44
<b>6</b>	<b>Interpolationsmethoden</b>	<b>48</b>

6.1	Lineare Interpolation zwischen zwei Kanten .....	48
6.2	Isolinien-Interpolation .....	49
6.3	Profilinterpolation.....	51
6.4	Räumliche Interpolation unter Verwendung von Restströmen .....	53
<b>7</b>	<b>Erweiterte Interpolations- und Approximationsmethoden .....</b>	<b>56</b>
7.1	Fuzzy-Interpolation und Konfidenzbestimmung .....	56
7.1.1	Grundlagen der Fuzzy-Zahlen und -Arithmetik .....	56
7.1.2	Fuzzy-Finite-Elemente-Interpolation .....	57
7.2	Künstliche Neuronale Netze .....	58
7.2.1	Grundlagen künstlicher Neuronaler Netze .....	59
7.2.2	Approximation im Raum .....	60
7.2.3	Approximation in Raum und Zeit.....	60
7.2.4	Ausblick.....	61
<b>8</b>	<b>Morphologische Analysen .....</b>	<b>62</b>
8.1	Identifikation von Erosion und Sedimentation .....	62
8.2	Morphologischer Raum .....	63
8.3	Morphologische Dynamik .....	64
8.4	Sedimentbilanz.....	64
8.5	Morphologische Geschwindigkeiten .....	65
8.6	Resultierender Transport.....	66
8.6.1	Resultierende Transporte vor der Insel Langeoog .....	67
<b>9</b>	<b>Optimierung von Messkonzepten.....</b>	<b>69</b>
9.1	Konzeption von Vermessungen für bathymetrische Daten.....	69
9.1.1	Regelmessungen .....	69
9.1.2	Bedarfsmessungen.....	69
9.1.3	Verkehrssicherungspeilung .....	70
9.1.4	Beweissicherung .....	70
9.2	Messkonzept für die Ostfriesischen Inseln.....	70
9.3	Messkonzept für Dithmarscher Bucht .....	71
9.4	Messkonzept für das Elbeästuar.....	71
9.5	Messkonzept für den Küstenabschnitt von Rostock bis Darßer Ort .....	72
9.6	Anforderungen an zukünftige Messkonzepte .....	73
9.7	Untere Abschätzung von Messhäufigkeiten.....	74
9.8	Obere Abschätzung von Messhäufigkeiten.....	75
<b>10</b>	<b>Workflow und Anwendungstools .....</b>	<b>78</b>
<b>11</b>	<b>Projektpräsentationen.....</b>	<b>82</b>
<b>12</b>	<b>Relevante Ergebnisse Dritter.....</b>	<b>82</b>
<b>13</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>82</b>
<b>14</b>	<b>Glossar.....</b>	<b>84</b>
<b>15</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>85</b>

# 1 Einleitung

Die Morphologie der deutschen Nord- und Ostseeküste verfügt über einen ausgeprägten Formenreichtum. Die ständige Wirkung von Meteorologie, Seegang und Tide führt in vielen Bereichen zu einer hohen Dynamik der Veränderung des Gewässerbodens. Die Beurteilung dieser morphodynamischen Veränderungen und zugehörigen Gestaltungsvorgänge bilden die Grundlage für nachhaltige Küstenschutz- und Entwicklungskonzepte. Wesentliche Ziele des Projektes „Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten im Küstennahbereich“ (ImTG) waren die Entwicklung und prototypische Implementierung von Methoden zur Erstellung zeitabhängiger quasi konsistenter digitaler Geländemodelle auf Basis von Vermessungsdaten. Auf Basis dieser Modelle sollten Verfahren zur Identifikation und Bewertung morphologischer Aktivitäten, Geschwindigkeiten und Tendenzen entwickelt werden. Solche digitalen Geländemodelle in Raum und Zeit können als Bindeglied zwischen Naturdaten und prozessbasierten Modellen dienen und zu einer ganzheitlichen Systemsicht und zu einem vertieften Verständnis der morphologischen Prozesse im Küstenbereich führen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen können dann Indikatoren für die Optimierung von Messkonzepten abgeleitet werden. Anhand ausgewählter morphologischer Fragestellungen wurden die prototypischen Implementierungen der Auswerte- und Analysemethoden getestet.

## 1.1 Projektpartner

Am Forschungsvorhaben waren der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), der Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN-SH), das Staatliche Amt für Umwelt und Naturschutz Rostock (StAUN Rostock) als auch die Bundesanstalt für Wasserbau Dienststelle Hamburg (BAW-DH) beteiligt. Das Projekt wurde während der gesamten Laufzeit von Oktober 2006 bis September 2009 von der KFKI-Projektgruppe begleitet.

## 1.2 Projektablauf und -schwerpunkte

Für die Analyse der morphodynamischen Veränderungen wurden über viele Jahrzehnte umfangreiche Vermessungen des Gewässerbodens vorgenommen. Ein wesentlicher Schwerpunkt, insbesondere in der ersten Projekthälfte, bestand im Zusammentragen und Verifizieren der vorhandenen Vermessungsdaten. Hierzu mussten unter anderem Dateifilter und Verfahren zur semiautomatischen Generierung von Metadaten implementiert werden sowie notwendige projektspezifische Metadaten ergänzt werden. Die Strukturerkennung als auch die Identifikation von Fehlern und deren Korrektur bildeten die wesentliche datentechnische Grundlage für einen weiteren erfolgreichen Projektverlauf.

Die, zum Teil mit erheblichem Zeitaufwand aufbereiteten Daten bildeten die Grundlage für den Aufbau eines datenbankgestützten digitalen bathymetrischen

Modells in Raum und Zeit. Um sowohl die Daten als auch die Metadaten und Methoden als eine Einheit zu betrachten, wurde das objektorientierte Datenbankmanagementsystem *db4o* [12] gewählt. Die hohe Dynamik bei der Entwicklung des eigentlichen Datenbankmanagementsystems *db4o* eröffnete während der Projektlaufzeit neue Perspektiven, bedeutete auf der anderen Seite jedoch mehrere Redesigns der Softwareprototypen. Bekannte Konzepte relationaler Datenbanksysteme zur effizienten Verwaltung großer Datenmengen konnten nicht auf die Verwaltung zum Teil strukturierter Vermessungspunkte übertragen werden. Hierfür wurde eine eigene mehrstufige Datenbankindizierung entwickelt und implementiert.

Neben der effizienten Verwaltung großer Mengen von Vermessungsdaten tragen die eingesetzten Interpolationen wesentlich zur Qualität der abgeleiteten Daten und Informationen bei. Während der Projektlaufzeit wurden insbesondere Interpolationen weiterentwickelt, die die Struktur der Vermessungsdaten und physikalische Gegebenheiten berücksichtigen. Die Einbindung von räumlicher und zeitlicher Interpolation in die datenbankbasierte digitale Bathymetrie eröffnete die Möglichkeit, an jedem Ort und zu jedem Zeitpunkt eine Tiefe zu ermitteln bzw. an jedem Ort eine ganze Zeitreihe der Tiefenentwicklung abzuleiten. Werden ein Zeitpunkt und eine Gebietsausdehnung angegeben, so kann für diesen Bereich eine quasikonsistente Bathymetrie abgeleitet werden. Werden keine expliziten Annahmen an die eingesetzten Interpolationsverfahren gestellt, so können künstliche Neuronale Netze verwendet werden, um aus den Vermessungsdaten durch Lernverfahren Approximationen der Tiefenverteilungen zu erhalten. Parallel zur eigentlichen Projektbearbeitung wurden kontinuierlich die Möglichkeiten des Einsatzes künstlicher Neuronaler Netze für die Bathymetrieapproximation untersucht.

Im zweiten Teil der Projektlaufzeit lag der Schwerpunkt der Bearbeitung in der Entwicklung von Algorithmen zur Bestimmung morphologischer Geschwindigkeiten und resultierender Sedimenttransporte sowie der Ableitung von Kenngrößen zur Optimierung von Messintervallen.

Die Einführung der Prototypen mit den zugehörigen Projektdatenbanken bei den Projektpartnern führte insbesondere zum Ende des Projektes zu erheblichem Entwicklungsaufwand, vor allem bei den graphischen Oberflächen der Prototypen. In zwei Schulungen wurden die Anforderungen aus der Praxis und der entwickelte Workflow mit den Projektpartnern diskutiert und entsprechende Anforderungsprofile formuliert, welche in die Softwareprototypen eingeflossen sind.

## 2 Projektgebiete

Mit den Projektpartnern wurden Gebiete unterschiedlichen Charakters und unterschiedlicher Ausdehnung festgelegt, für welche Vermessungsdaten zusammengestellt wurden. Hierzu gehörten Küstenabschnitte der Nordsee im Bereich der Ostfriesischen Inseln, dem Elbmündungsgebiet und der Dithmarscher Bucht. Die Wahl eines geeigneten Projektgebietes an der deutschen Ostseeküste gestaltete sich auf Grund der recht schlechten Datenlage als schwierig. In der ersten Hälfte des Projekts wurde versucht, der Küstenabschnitt von Rostock/Warnemünde bis zum Darßer Ort als Projektgebiet zu betrachten. Der Bereich wurde dann jedoch auf den Küstenabschnitt im Bereich der Stranddrainage Markgrafenheide reduziert, da sich nur für dieses Gebiet noch eine annähernd ausreichende Datenlage ergab. Im Folgenden werden die Projektgebiete charakterisiert.

### 2.1 Projektgebiet Ostfriesische Inseln

Die Ostfriesischen Inseln sind durch den Einfluss von Seegang und Strömungen ständigen morphologischen Veränderungen unterworfen. Die Stabilität der Inseln wird dabei durch ein dynamisches Gleichgewicht aus Abbruch und Anwuchs an Stränden und Dünen sichergestellt. Dazu ist eine fortwährende Sedimentversorgung notwendig, die aus dem überwiegend von West nach Ost gerichteten küstenparallelen Sandtransport resultiert. Zwischen den Inseln wird der Sand durch die starke Gezeitenströmung in den Seegaten nach Norden abgelenkt. Es bilden sich sogenannte Riffbögen aus, die sich aus unterschiedlich großen Platen (Sandbänken) zusammensetzen. Das Sediment durchwandert den Riffbogen in Form von Platengruppen, bevor es sich an der östlich gelegenen Insel anlagert und dort für eine natürliche Auffüllung der Strände sorgt. Zwischen den Platanlandungen kommt es örtlich begrenzt immer wieder zu Phasen mit negativer Sandbilanz, die verstärkte Strand- und Dünenverluste zur Folge haben können.



**Abbildung 1** Projektgebiet Ostfriesische Inseln mit in KML exportierten umschreibenden Rechtecken der Vermessungen

Ob derartige Erosionen eine temporäre Erscheinung sind oder ob es sich um eine strukturelle Sandunterversorgung handelt, kann nur im Kontext großräumiger morphologischer Entwicklungen beurteilt werden [18].

Von den Ostfriesischen Inseln im Projektgebiet (Borkum, Memmert, Juist, Norderney, Baltrum, Langeoog und Siekerooog) werden im Rahmen des Projektes vor allem Untersuchungen im Bereich der Inseln Langeoog und Juist durchgeführt.

### 2.1.1 Langeoog

Auf Langeoog kommt es vor allem vor dem Pirolatal am Nordstrand zu starken Dünenabbrüchen. Dadurch besteht unter anderem eine Gefährdung der öffentlichen Trinkwasserversorgung auf Langeoog, die aus der Süßwasserlinse unter dem Pirolatal gespeist wird. Trotz zahlreicher Strandauffüllungen kommt es regelmäßig zu neuen Abbrüchen, die immer wieder eine inselseitige Verstärkung der Schutzdünen erfordern.

Im Zusammenhang mit den Erosionen nördlich des Pirolatals sind eine deutliche Südverlagerung der Strandlinie und eine sehr geringe Strandbreite zu verzeichnen. Untersuchungen ergaben, dass voraussichtlich mit der Anlandung neuer Platenfronten am Nordstrand zu rechnen ist. Das Ausmaß dieser neuen Sandzufuhr wird aber wahrscheinlich zu gering sein, um eine nachhaltige Verbesserung der Vorstrandsituation zu gewährleisten, so dass vor dem Pirolatal ein langfristiges Sandmangelgebiet erhalten bleiben wird. Zur Absicherung dieser Aussagen sind weitere genaue Beobachtungen und Vermessungen erforderlich [19].

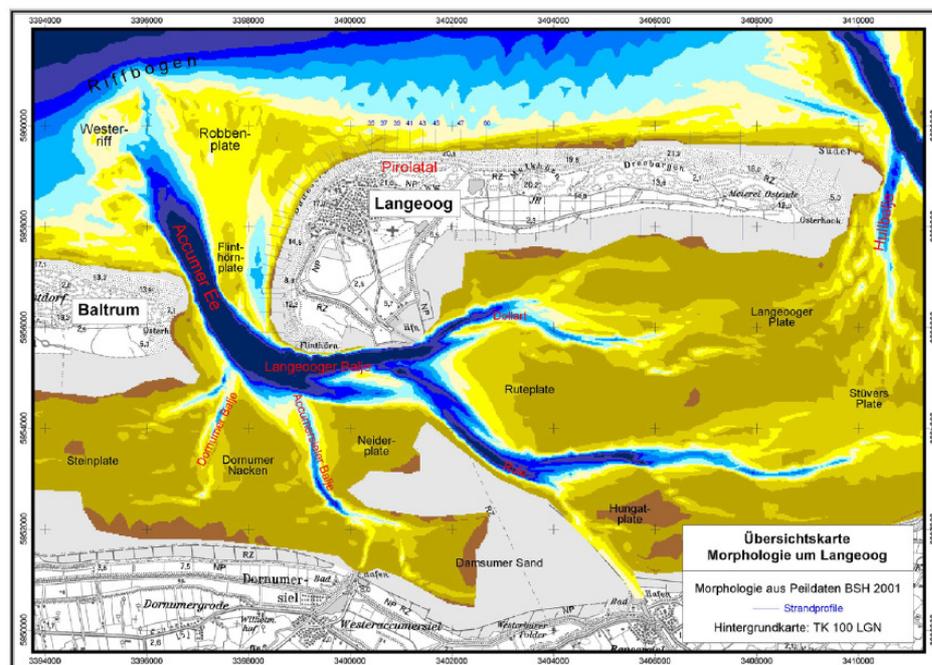


Abbildung 2 Übersichtskarte Langeoog [19]

### 2.1.2 Juist

Der westliche Strandbereich der Insel Juist liegt seit den 70'er Jahren im Abbruch. Folgen der negativen Sedimentbilanz sind jährliche Dünenabbrüche von mehreren Metern, die Südverlagerung der Strandlinie, die Abnahme des Strandniveaus sowie die Vergrößerung der Vorstrandneigung. Die Dünenabbrüche konzentrieren sich auf das Gebiet zwischen dem Westende der Insel und dem Hammersee, wobei der Rückgang der Schutzdüne im Bereich des Billpolders besonders gravierend ist. Um eine nachhaltige Sicherung der Insel gewährleisten zu können, ist die Abschätzung der zukünftigen morphologischen Entwicklung im Umfeld Juists von maßgebender Bedeutung [20].

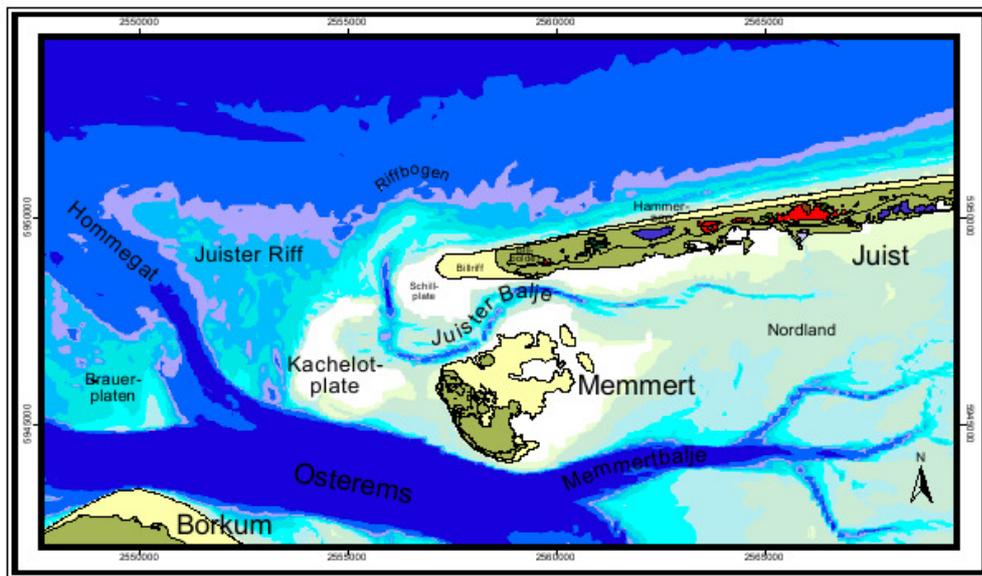


Abbildung 3 Übersichtskarte Juist [20]

### 2.1.3 Anthropogene Eingriffe

Die Ostfriesischen Inseln sind durch ihre exponierte Lage vor dem Festland besonders den Naturkräften wie Seegang und Sturm ausgesetzt. Schon seit Jahrhunderten versuchen die Menschen die Inseln durch verschiedene Baumaßnahmen zu schützen. Typische anthropogene Eingriffe sind der Bau von Deichen, Buhnen und Deckwerken wie auch das Aufspülen des Strandes.

Die anthropogenen Eingriffe in den beiden Projektgebieten Juist und Langeoog bestehen hauptsächlich aus Sandumlagerungen im terrestrischen sowie inselnahen Bereich, die zu Zwecken des Küstenschutzes erforderlich waren und sind. So wurden auf Juist für rückseitige Dünenverstärkungen größere Sandmengen aus dem am Westende der Insel liegenden Billriff entnommen. Ein Nachaufmaß der Entnahmestelle zeigte eine schnelle Regenerierung auf ein annähernd ursprüngliches Niveau.

Auf der Insel Langeoog wurde für die wiederholte rückseitige Verstärkung der Dünen am Pirolatal ebenfalls Material direkt vom Strand im östlichen Aggregationsbereich der Insel entnommen. In den Jahren 1982 bis 1994 wurden außerdem sechs

Strandaufspülungen vorgenommen. Das hierzu nötige Material stammte meist aus dem Vorstrandbereich von Flinthörn, dem südwestlichen Ende der Insel. Das Material für die bisher letzte Aufspülung von 1994 konnte aus dem Bereich nordöstlich der Accumer Ee gewonnen und über eine Dükerleitung zur Insel transportiert werden.

Um auch Bauwerke wie Buhnen in die spätere Bathymetrie-Datenbank zu integrieren, wurden zusätzlich anthropogene Eingriffe der Insel Norderney zusammengetragen. Veränderungen in der Sandversorgung Norderneys führten im Laufe des frühen 19. Jahrhunderts zu einem hohem Sand- und Strandverlust an der Westseite der Insel und zum Abbruch der Randdünen im Laufe der folgenden Jahre. Dieser Küstenerosion wurde ab dem Jahr 1858 unter anderem durch den Bau von Buhnen entgegengewirkt. In den Jahren 2001 bis 2008 erfolgte eine aufwändige Sanierung und der Umbau der bis dahin fast 150 Jahre alten Sturmflutschutzanlagen.

Weitere Eingriffe in das morphologische System der Inseln stellen die Baumaßnahmen für zwei größere Gasleitungen dar, die die Inseln in nord-südlicher Richtung kreuzen. Die Leitung auf Juist verläuft in dem heute relativ inaktiven Bereich an der Grenze der Haaksdünen im Westen der Insel und dem Billriff. Sie wurde in den 1970er Jahren gebaut und bedeutete ausgedehnte Baggerarbeiten und somit einen erheblichen Eingriff in das System. Nachdem die Leitung durch Erosion der abdeckenden Sandschicht streckenweise wieder freigelegt war, wurde sie durch ein Unterwasserdeckwerk abgesichert.

Der Bau der „Europipe“ durch die norwegische Firma STATOIL zwischen Baltrum und Langeoog im Sommer 1994 war mit relativ großen Eingriffen verbunden, da die Trasse am Meeresgrund bis zu einer Tiefe von NN -15 m ausgehoben, das Material umgelagert und dann wieder zurückgespült wurde. Zudem fand der Bau im Seegatt und Riffbogen der Accumer Ee und somit in einem morphologisch sehr aktiven Bereich statt.

### **2.2 Projektgebiet Dithmarscher Bucht**

Die Dithmarscher Bucht wird zentral geprägt durch das Prielsystem der Piep, das sich westlich und südlich von Büsum bis in die Meldorfer Bucht erstreckt. Die Wattwasserscheide der Marnen Plate von der Vogelschutzinsel Trischen ostwärts bis zum Trischendammtrennt dieses Einzugsgebiet von dem nach Süden anschließenden Wattengebiet, das dem Elbemündungstrichter zuzuordnen ist.

Die morphologische Entwicklung ist sowohl durch natürliche als auch durch anthropogene Effekte gekennzeichnet. Als natürlicher Einfluss wirkt vorrangig die Tide mit einem durchschnittlichen Tidenhub von 3,2 m. Nachrangig wirkt der Seegang mit vorherrschenden westlichen Winden und der Dämpfung durch die Watten. Das Oberflächensediment besteht zumeist aus Feinsand. Bei dem hohen Tidenhub wird das überwiegende Material als Suspension mit gleichmäßiger Verteilung in der Wassersäule transportiert. Das Sedimentmaterial entstammt überwiegend dem Angebot der Nordsee sowie der Elbe.

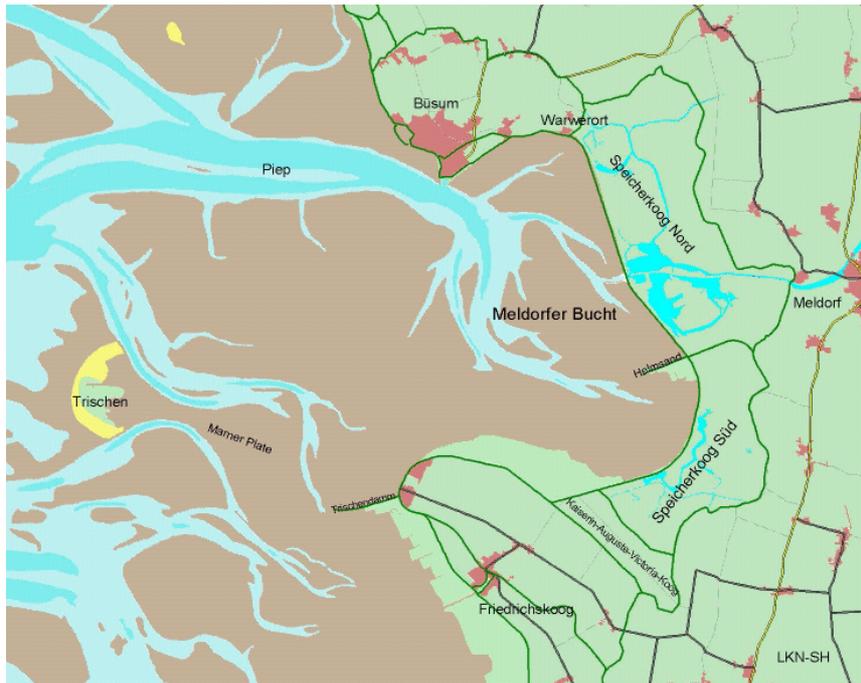


Abbildung 4 Projektgebiet Dithmarscher Bucht

### 2.2.1 Anthropogene Eingriffe

Das Einzugsgebiet der Piep ist durch die Eindeichung der Melderfer Bucht geprägt. Nach den durch die Sturmflut von 1962 verursachten Schäden wurde ein Deichneubau, verbunden mit einer Verkürzung der Deichlinie von ursprünglich ca. 30 km auf nun ca. 15 km, beschlossen.

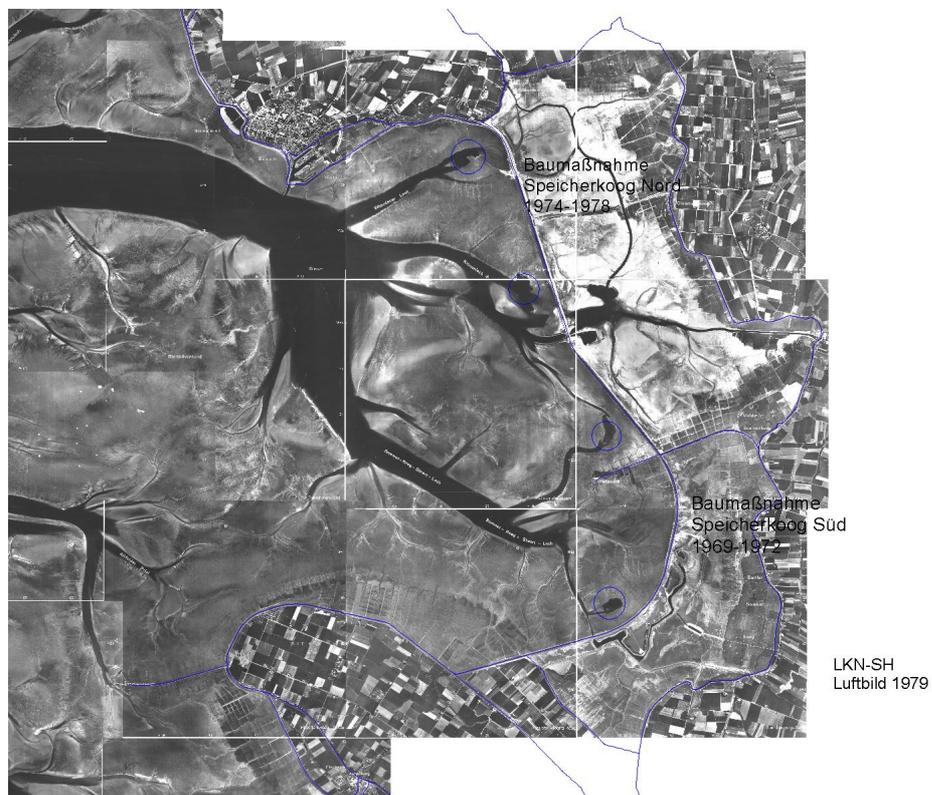


Abbildung 5 Eindeichung der Melderfer Bucht

Die Baumaßnahmen wurden in zwei Bauabschnitten durchgeführt. Von 1969 bis 1972 wurde der rund 6 km lange Schutzdeich vom Kaiserin-Auguste-Viktoria-Koog bis nach Helmsand errichtet und somit der Speicherkoog Süd mit einer Fläche von ca. 16 km<sup>2</sup> eingedeicht.

Von 1974 bis 1978 wurde in einer zweiten Bauphase ein rund 8.5 km langer Schutzdeich von Helmsand bis nach Warwerort errichtet, es entstand der Speicherkoog Nord mit einer Fläche von ca. 32 km<sup>2</sup>.

Die Deiche bestehen aus einem Sandkern mit einer Kleibodenabdeckung.

Der benötigte Sand wurde seewärts der neuen Trasse aus insgesamt vier Entnahmestellen gewonnen.

Durch diese Deichverkürzungsmaßnahmen wurde das Einzugsgebiet der Piep um etwa 50 km<sup>2</sup> vermindert. Dieses führte zu Anpassungen der vorgelagerten Prielsysteme, die sich entsprechend in der Breite und Tiefe reduzierten.

### 2.3 Projektgebiet Elbeästuar

Die Elbe und insbesondere die Außenelbe ist die bedeutendste Schifffahrtsstraße in Deutschland. Über das Elbe-Ästuar ist der Hamburger Hafen mit der Nordsee verbunden. Das heutige Elbe-Ästuar ist ganz wesentlich durch die Schifffahrtsrinne, weitere tiefe Rinnen, Sandbänke, Inseln und ausgedehnte Wattgebiete geprägt.

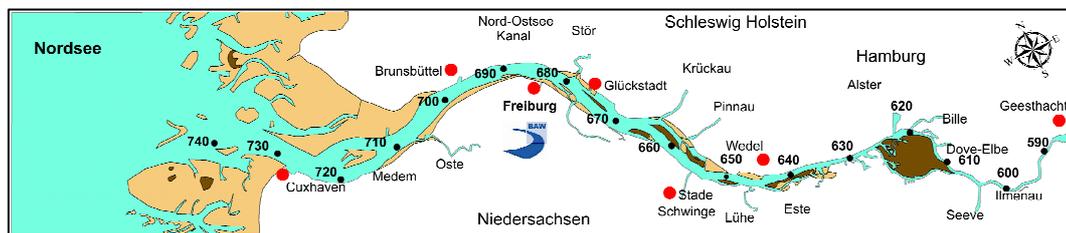
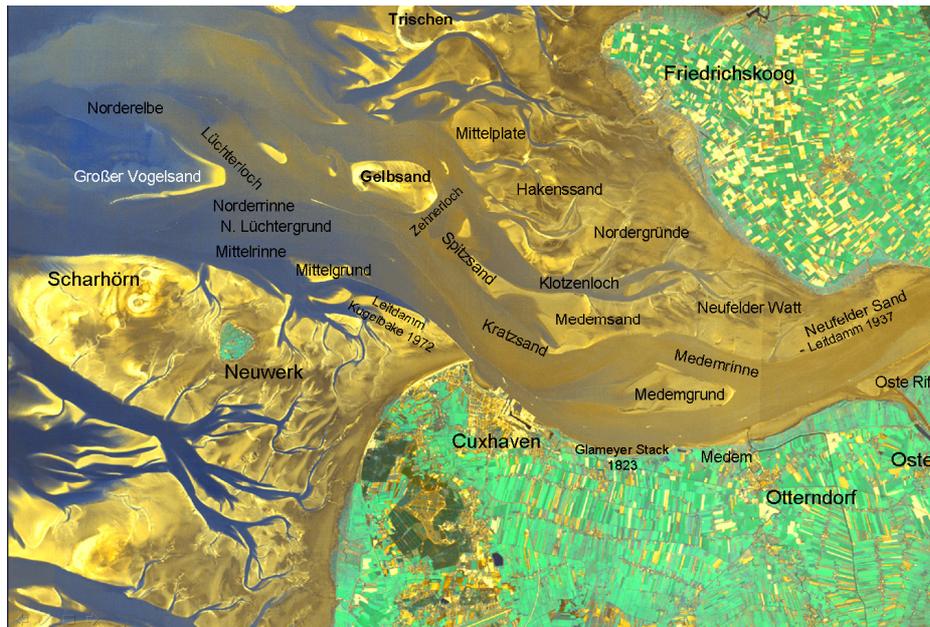


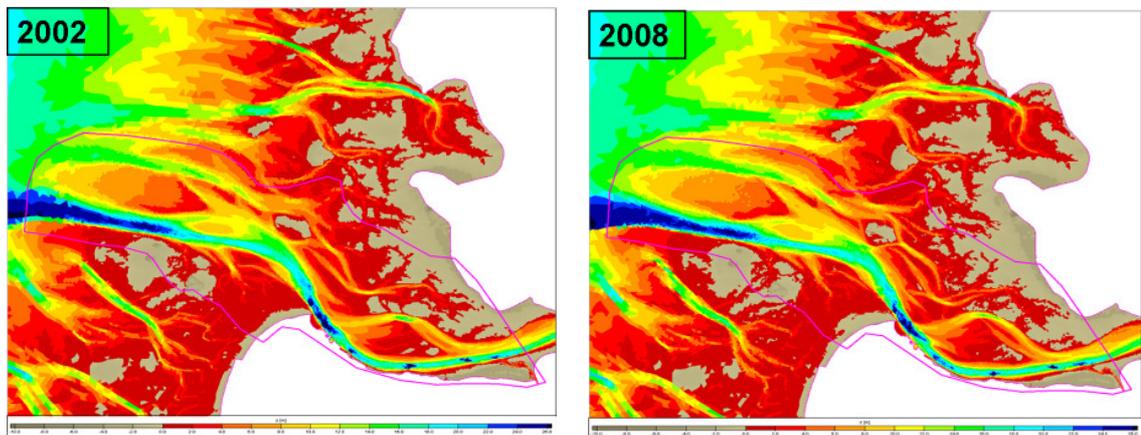
Abbildung 6 Projektgebiet Elbe mit Elbe-km

Aus geologischer Sicht ist das Elbe-Ästuar eiszeitlich und nacheiszeitlich geprägt, d.h. die oberflächennah anstehenden Sedimente sind holozänen und pleistozänen Ursprungs. Die Holozänbasis ist infolge von Erosionsrinnen unregelmäßig. Im Mündungsbereich der Elbe befinden sich oberflächennah überwiegend holozäne Sedimente (Klei, Sand). Östlich von Elbe-km 640 tritt an der Gewässersohle auch pleistozäner Geschiebemergel auf. Eine auffällige, rezente Entwicklung stellen die Verschlickung von Nebenelben und anderer schwächer durchströmter Gebiete dar. Die wesentlich prägenden Wirkgrößen sind einerseits hydrologischer Natur (Tideströmung, Oberwasserabfluss und Seegang) und andererseits anthropogenen Ursprungs (Eindeichungen und Fahrwasservertiefungen bzw. -begradigungen sowie Strombauwerke).



**Abbildung 7** Elbeästuar mit Gebietsbezeichnungen

In den letzten Jahren kam es, nach einer recht langen Zeit stetiger Veränderungen, zu nicht erwarteten starken Änderungen im Bereich der Medemrinne (Abbildung 8), welche sich mit bis zu 200 Meter/Jahr nach Norden verlagert hat. Auswertungen der BAW-DH im Bereich des Markierungspolygons der Darstellung, haben eine Zunahme des Sedimentvolumens von rund 1,2% ergeben.



**Abbildung 8** Nördliche Verlagerung der Medemrinne gezeigt an den Jahren 2002 und 2008. Das Wasservolumen unterhalb von +2,0m NN innerhalb des eingezeichneten Markierungspolygons nahm in dieser Zeit um rund 70 Mio. m<sup>3</sup> von 6013 Mio. m<sup>3</sup> im Jahr 2002 auf 5942 Mio. m<sup>3</sup> im Jahr 2008 ab.

### 2.3.1 Anthropogene Eingriffe

Mit dem Aufkommen der ersten Dampfbagger auf der Niederelbe begann Mitte des 19. Jahrhunderts der etappenweise Ausbau des Elbfahrwassers, der in wechselnder Folge die Beseitigung von Untiefen, Sohlvertiefungen, Verbreiterungen und Querschnittsaufweitungen sowie Fahrwasserbegradigungen und -fixierungen beinhaltete.

Die Außen- und Untereibe wurde in der Vergangenheit mehrfach vertieft. Zwischen 1922 und 1950 fand der „-10,0 KN-Ausbau“ der Elbe statt. Bereits sieben Jahre nach Abschluss dieser Arbeiten begann die Vertiefung auf KN -11,0 m, die 1962 abgeschlossen war. Von 1964 bis 1969 wurde eine Fahrrinntiefe von KN -12,0 m hergestellt und von 1974 bis 1978 wurde die Elbe auf KN -13,50 m vertieft. Seit 1999 beträgt die vorherrschende Solltiefe KN -14,4 m.

Die so geschaffenen Fahrrinnen mussten ständig durch Unterhaltungsbaggerungen erhalten werden.

Eine weitere Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe für 14,5 m tiefgehende Containerschiffe ist derzeit in Planung.

Neben den Sohlvertiefungen stellt der Bau des Kugelbakeleitdammes (1939 bis 1972 mit Unterbrechung in den Kriegsjahren) einen nachhaltigen anthropogenen Eingriff im Außenelberegion dar. Zwischen 1975 und 1977 wurde dieser Leitdamm von ca. 9 km auf ca. 10 km verlängert. Die Motivation dieser Baumaßnahme war die Schaffung eines stabilen Fahrwassers. Das Neuwerker Fahrwasser, als eine der damals vorhandenen drei großen Rinnen im Außenelberegion, wurde durch diese Maßnahme abgetrennt, so dass dieses Gebiet seitdem durch die Mittelrinne und die Norderrinne gekennzeichnet ist.

### 2.4 Projektgebiet Rostock bis zum Darß

Der Küstenabschnitt Rostock bis Darßer Ort an der mecklenburgisch-vorpommerschen Ostseeküste kann aufgrund seiner Lage aus morphologischer und sedimentologischer Sicht als relativ abgeschlossener Untersuchungsraum betrachtet werden. Der Bereich beginnt im Südosten mit den beiden Molen der Hafenzufahrt zum Rostocker Überseehafen, die durch ihr weites Hineinragen in die Ostsee den küstenparallelen Sedimenttransport fast vollständig unterbrechen. Die Küste zieht sich dann in nordöstlicher Richtung im Wechsel von Flach- und Steilküsten mit mehr oder minder starker Abrasion über die Ortslagen Markgrafenheide, Graal-Müritz, Dierhagen, Wustrow und Ahrenshoop bis zum Darßer Ort hin.

Etwa 70% der Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern befinden sich unter Abrasion, 7% unter Akkumulation und 23% haben eine ausgeglichene Bilanz. Die durchschnittliche Abrasionsrate beträgt dabei 35 cm/Jahr, also 35 m in 100 Jahren. Für das Untersuchungsgebiet gibt es dabei Abrasionsraten bis zu 2 m/Jahr. Die größten Abrasionsgebiete liegen in den Steilküstenbereichen von Rosenort (bis 2,1 m/Jahr) und zwischen Wustrow und Ahrenshoop (bis 1,7 m/Jahr). Akkumulationsflächen sind nur am Darßer Ort zu finden, dessen große Schaarfläche ständig durch Sand aufgefüllt und vergrößert wird und dessen nordöstliche Spitze allein in den letzten 300 Jahren, seit der Aufnahme der Schwedischen Matrikelkarte 1692-1696, um 1,2 km verlängert wurde.

### 2.4.1 Ortslage Markgrafenheide

Der Küstenabschnitt vor der Ortslage Markgrafenheide wird westlich am Küstenkilometer F148,500 von der Mole der Hafenausfahrt von Rostock und östlich am Küstenkilometer F156,500 durch das Gebiet des Rosenortes in der Rostocker Heide begrenzt. Der 8 km lange Küstenabschnitt ist durch einen durchschnittlich 40 m breiten Strand gekennzeichnet, der dann in eine Hochwasserschutzdüne übergeht und an die Ortslage von Markgrafenheide anschließt.



Abbildung 9 Luftbild der Ortslage Markgrafenheide

Das Gebiet westlich Markgrafenheide ist neben der natürlichen Abrasion auch starken Rückgangsprozessen infolge der anthropogenen Eingriffe durch den Vorbau der Molen in See als Hafenausfahrt des Überseehafens Rostock unterlegen. Der östlich anschließende Abschnitt bis zur Rostocker Heide bei Rosenort mit einem reinen ca. 2,7 m hohen Heidesandkliff liegt nur wenig über Normalmittelwasserniveau und ist ein stark überflutungsgefährdetes Heidesandgebiet. Seeseitig reichen Großrippelfelder bis 800 m an die Küste heran, stellenweise sogar bis direkt zur Wasser-Strandlinie. Im Sturmflutfall sind diese Gebiete bei Bemessungshochwasser fast vollständig potentiell überflutungsgefährdet.

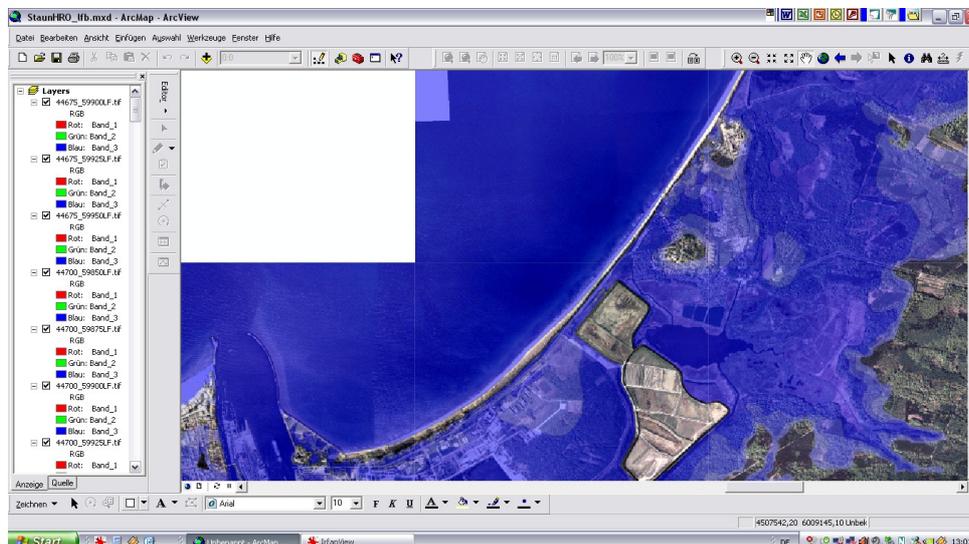
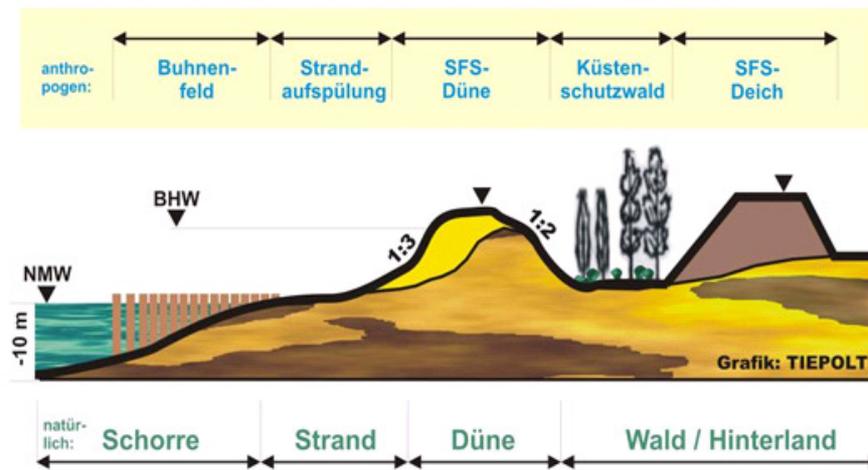


Abbildung 10 Mögliche Überflutungsfläche bei Bemessungshochwasser

### 2.4.2 Anthropogene Eingriffe

Den morphologischen Veränderungen wirken zum Teil massive Küstenschutzmaßnahmen, wie z. B. Aufspülungen, entgegen. Dies führt dazu, dass stark abradierete Gebiete zum Teil keine negative Tendenz aufweisen können, da z. B. eine kurz zuvor erfolgte Aufspülung im Strand- und Schorrebereich die Uferlinie wieder um 20-30 Meter seewärts verlegt hat, und damit die Abrasionsraten von 10 und mehr Jahren ausgeglichen wurden. Deshalb ist es immer notwendig, die gemessenen Küstenveränderungen mit den vorhandenen Küstenschutzbauwerken in Beziehung zu setzen, um die naturnahe Küstendynamik verifizieren zu können.

#### Schema der Küstenschutzanlagen von Mecklenburg-Vorpommern (MV)



**Abbildung 11** Klassisches Schutzsystem gegen Wasserhochstand

Zum Schutz vor im Zusammenhang bebauten Gebieten führt die Abteilung Küste des StAUN eine Vielzahl von Küstenschutzmaßnahmen durch, wobei das klassische Schutzsystem in Abbildung 11 dargestellt ist. Den größten Anteil im Untersuchungsgebiet haben dabei die Aufspülungen im Strand- und Dünenbereich, wo allein zwischen 1990-2009 insgesamt 6,85 Millionen Kubikmeter Sand auf 30 km Länge (durchschnittliches Wiederholungsintervall 6-7 Jahre) aus seeseitigen Sandentnahmestellen aufgetragen wurden.

Im Einzelfall kann das System stark von der Abbildung abweichen, da für jedes Gebiet konkrete Maßnahmen geplant und projiziert werden. Für das Untersuchungsgebiet sind die bestehenden Küstenschutzanlagen und deren Verteilung in den Abbildung 12 und Abbildung 13 aufgeführt.



**Abbildung 12** Art der bestehenden Küstenschutzanlagen im Bereich Rostock bis zum Darß



**Abbildung 13** Verteilung der Küstenschutzanlagen aus Abbildung 12 im Projektgebiet

## 3 Datengrundlage

Die Basis für den Aufbau digitaler bathymetrischer Modelle in Raum und Zeit bilden die von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Vermessungsdaten unterschiedlicher Qualität und Quantität. Neben den eigentlichen Vermessungsdaten standen auch georeferenzierte Orthofotos zur Orientierung und Einordnung zur Verfügung. Im folgenden Abschnitt wird auf die Datengrundlagen eingegangen.

### 3.1 Datenquellen

Seevermessungen zur Aufnahme des Meeresbodens und der Wattflächen werden in Deutschland von mehreren Institutionen und Ingenieurbüros mit unterschiedlichen Zielsetzungen durchgeführt. Je nach Verfügbarkeit der Ressourcen und Anforderungen an die Genauigkeit der Vermessung kommen unterschiedliche Messverfahren zum Einsatz.

Für Vermessungen bei ausreichender Wassertiefe werden vor allem Echolotungen vom Schiff aus eingesetzt. In Ufernähe werden in der Regel Profilmessungen häufig noch mit Meßblatten durchgeführt. Für trockene Bereiche gewinnen Laserscanbefliegungen immer mehr an Bedeutung. Zusätzlich stehen zum Teil digitalisierte Wattgrunddaten aus historischen Vermessungen zur Verfügung.

Da die morphologischen Veränderungen zum Teil stark durch Küstenschutzmaßnahmen beeinflusst werden, ist es wichtig, die gemessenen Veränderungen mit den anthropogenen Eingriffen in Beziehung zu setzen. Für die Erstellung eines digitalen Geländemodells müssen solche Eingriffe in das Modell integriert werden. Neben den Seevermessungen wurden daher zusätzliche Informationen zu anthropogenen Eingriffen in unterschiedlicher Form zur Verfügung gestellt.

### 3.2 Daten für Seevermessungen

Seevermessungen dienen der Erfassung der Lage des Meeresbodens. Die Vermessung des Gewässerbodens erfolgt entsprechend den örtlichen Gegebenheiten und dem Stand der Technik auf ganz unterschiedliche Art und Weise. Neben terrestrischen Vermessungen in unmittelbarer Küstennähe, z. B. in Form von Profilvermessungen, erfolgt der Großteil der Vermessungen mit Schiffen. Sollen historische Tiefenverhältnisse mit aufgenommen werden, dies war insbesondere für die Dithmarscher Bucht der Fall, so standen diese als digitalisierte Blattschnitte zur Verfügung. Der Charakter als auch die technischen Rahmenbedingungen der Vermessungen spielt bei der Interpretation der Daten eine wesentliche Rolle.

Die von den einzelnen Projektpartnern zur Verfügung gestellten „Original“-Daten sollten für das Projekt nach Möglichkeit *tagesgenau* in *Digitalen Vermessungen* zusammengefasst werden. Hierbei wurde angestrebt, Strukturinformationen, wie z. B. Vermessungspunkte, die zu einer Isolinie oder einem Profil gehören, mit zu hinterlegen. Jede dieser Vermessungen wird mit Metadaten versehen. Zu den Metadaten gehören beispielsweise das Datum, eine Bounding-Box der Daten, die

Ursprungsdateien der Vermessungspunkte, gegebenenfalls eine Fahrwasserbezeichnung, die Blattschnittnummer bei digitalisierten Karten oder eine Profilvernummer.

Im Folgenden wird auf die Strukturen der Vermessungsdaten eingegangen, die sich abhängig vom Messverfahren ergeben können. Diese bestimmen wesentlich die zu verwendenden Interpolationsmethoden. Die Information über das Messverfahren als auch die Struktur in den Daten muss im Zuge der Datenaufbereitung sowie bei der Archivierung erhalten bleiben.

#### 3.2.1 Datenstruktur

Die eingesetzten unterschiedlichen Messverfahren führen zu entsprechenden topologischen Strukturen in den Vermessungsdaten. Im Rahmen des Projektes konnte folgende Klassifikation vorgenommen werden:

- Einzelvermessungen
- Profilvermessungen
- digitalisierte Isolinien
- linienhafte Echolotvermessungsdaten
- flächenhafte Echolotvermessungsdaten
- unregelmäßig verteilte Vermessungspunkte
- reguläre Rasterdaten aus Befliegungen.

**Reguläre Rasterdaten** lassen sich beispielsweise sehr effizient ablegen und ermöglichen einfache Analysen wie die Bestimmung von Gradienten. Diese Strukturinformation bleibt in der Regel bei der Archivierung erhalten und ermöglicht beispielsweise eine bilineare Interpolation.

**Profilvermessungen, digitalisierte Isolinien als auch Linienpeilungen** führen dazu, dass die Vermessungspunkte in einer ausgezeichneten Reihenfolge aufgenommen werden. Häufig sind diese Informationen bei der Archivierung verloren gegangen. Für die Zurückgewinnung dieser Strukturinformationen wurden angepasste Algorithmen entwickelt (siehe Kapitel 4.2). Ergebnisse sind in Abbildung 14 gezeigt.



**Abbildung 14** Erkannte Strukturen bei Isolinien, Profilen und Linienpeilungen

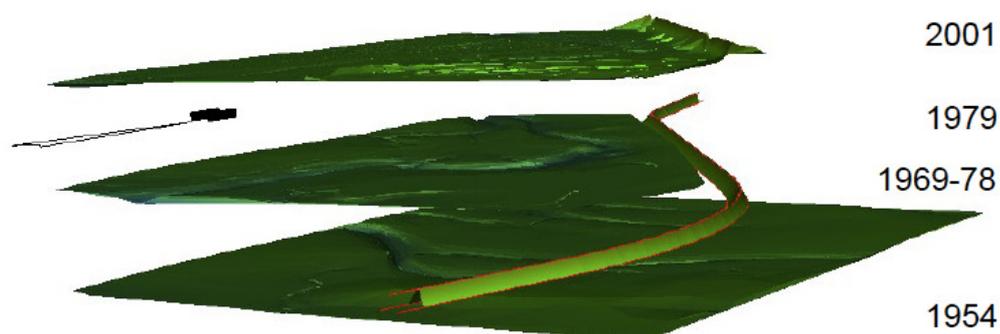
**Unregelmäßig verteilte Vermessungspunkte** haben auf den ersten Blick keine ausgeprägten Strukturinformationen. Werden solche Punktmengen mit einer Delaunay-Triangulation in ein Dreiecksnetz überführt, kann dies unter Umständen zu falschen Ergebnissen führen. Die Berücksichtigung von Strukturinformationen, wie bekannte Bruchkanten als Zwangskanten, führt zu einer wesentlich besseren Abbildung der Geländeoberfläche.

### 3.3 Daten für anthropogene Eingriffe / Bauwerksdaten

Über Jahrhunderte hinweg versucht der Mensch den Lebensraum Küste nach seinen Bedürfnissen zu gestalten. Hierbei geht es zum einen um den Schutz von Bauwerken und Landflächen vor den Kräften des Meeres und zum anderen um die Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt.

Anthropogene Eingriffe lassen sich unterteilen in starre/feste und weiche Eingriffe. Zu den starren Eingriffen gehören beispielsweise der Bau von Deichen, Buhnen, Leitwerken und Deckwerken. Bei der Berücksichtigung im Rahmen zeitvarianter digitaler Geländemodelle stellen solche starren Bauwerke Zwangshorizonte im Ort und quasi Brüche in der Zeit dar. Zu den weichen Eingriffen werden vor allem Sandvor- bzw. -aufspülungen gezählt, die nur Brüche bzw. Sprünge in der Zeit darstellen. Die Berücksichtigung von Baggerungen und Verklappungen stellen viele solcher weichen Eingriffe in unterschiedlichen zeitlichen und örtlichen Ausdehnungen dar.

Für starre anthropogene Eingriffe wie Buhnen und Deiche können aus den Konstruktionsunterlagen Ersatz- bzw. Teilgeländemodelle entwickelt werden, die mit einem Zeitstempel versehen wie digitale Vermessungen behandelt werden können. Solche starren Eingriffe stellen einen nichterodierbaren Horizont dar und können als ein solcher bei der Interpolation berücksichtigt werden.



**Abbildung 15** Digitale Vermessungen mit Ersatzmodell der Eindeichung der Meldorfer Bucht

Die Berücksichtigung von weichen anthropogenen Eingriffen ist bei Sandvorspülungen ähnlich zu realisieren, wie dies für starre Bauwerke der Fall ist, mit der Ausnahme, dass diese in der Regel umgelagert werden können. Die Berücksichtigung von Baggermaßnahmen und Verklappungen ist wesentlich komplexer. Zum einen liegen die Bagger- und Verklappungsinformationen häufig in

Tabellenform vor, und zum anderen ist die örtliche Ausdehnung und Form der entstehenden Geländeformen nicht genau bekannt. Große Baggerstellen, wie sie bei der Erstellung der Eindeichung der Meldorfer Bucht oder bei großen Aufspülmaßnahmen entstehen, können aber wiederum als Ersatzmodelle berücksichtigt werden.

#### 3.4 Metadaten

Metadaten dienen der Beschreibung von Daten. Die im Projekt genutzten Metadaten orientieren sich an den Nokis-Metadaten und wurden um projektspezifische Metadaten erweitert. Metadaten sollen in der Regel den Zeitpunkt der Datenerfassung und den dabei verwendeten Verfahren, Angaben zur Datenqualität und zum Aussagebereich beinhalten. Zum Teil waren die Metadaten fester Bestandteil der zusammengetragenen Datensätze. Allein die Metadaten können schon zur Analyse der durchgeführten Vermessungen herangezogen werden. Auf der Basis der Metadaten kann z. B. analysiert werden, wie häufig und in welchen zeitlichen Intervallen an einem Ort Vermessungen durchgeführt wurden und wie sich die Messdichte und Genauigkeit entwickelt haben.

Vermessungen der Gewässersohle werden von unterschiedlichen Institutionen an verschiedenen Orten und zu unterschiedlichen Zeiten mit bestimmten Zielsetzungen durchgeführt. So vermessen beispielsweise Wasser- und Schifffahrtsämter in der Regel Schifffahrtsstraßen unter der Zielsetzung, die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt sicherzustellen. Etwas großräumiger gestalten sich die Aufgaben des BSH, welches zusätzlich synoptische Karten erstellt. Werden im Umfeld von anthropogenen Eingriffen Beweissicherungsvermessungen durchgeführt, so sind in der Regel großräumige Auswirkungen von Interesse. Das Vermerken solcher Ziele, z. B. Verkehrssicherungspeilung, in den Metadaten ist für die Zukunft wünschenswert. Um die Vertrauenswürdigkeit der interpolierten Höhen anzugeben, wird die Spezifikation der Interpolationsmethoden, des Aussagebereiches und der Unschärfe der Vermessungen benötigt.

Für die Berücksichtigung anthropogener Eingriffe sind auch diese Daten und Informationen mit ausführlichen Metadaten zu versehen. Entsprechend der Klassifizierung in starre und weiche Eingriffe sind hier ebenfalls Aussagebereich, Beschreibungsmethodik, Ungenauigkeit und zeitliche Einordnung mit aufzunehmen.

Aus Sicht der digitalen Geländemodellierung in Raum und Zeit spielen daher neben den klassischen Metadaten (wer, wann, wo usw.) vor allem die möglichst genaue

- zeitliche und
- örtliche Einordnung

eine wichtige Rolle. Neben dieser Einordnung sind für die Interpolation eingesetzten Messverfahren und daraus ableitbare

- Höhen- und Lageunschärfen,
- die Aussagebereiche und

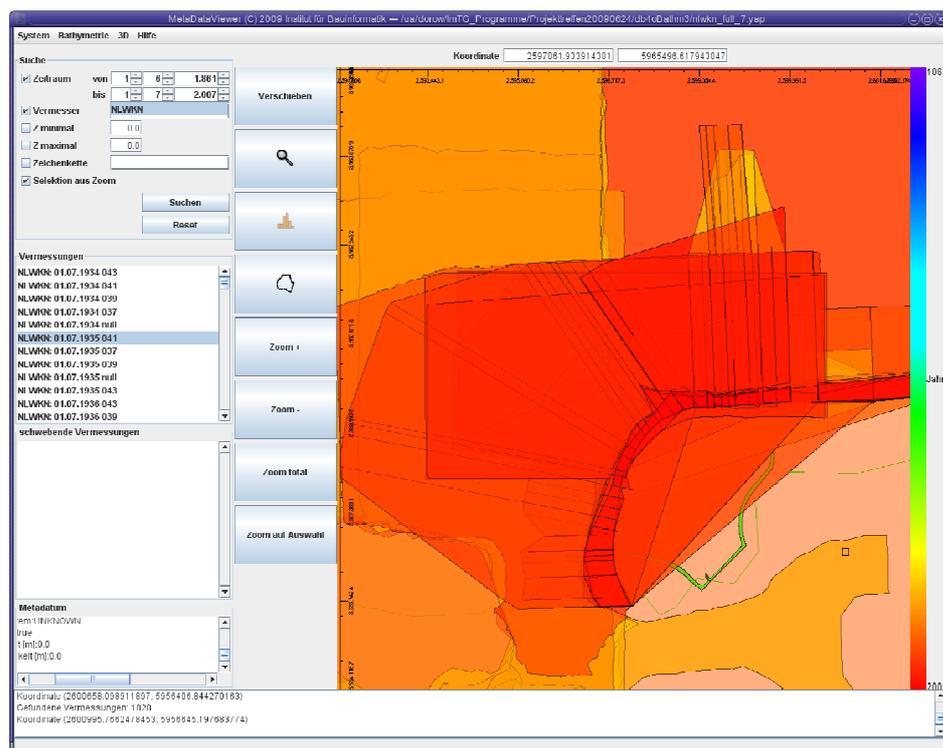
- zugehörigen Interpolationsmethoden

von Interesse. Hier ist insbesondere ein durchgängiges Processing, beginnend bei der Planung von Vermessungen bis hin zur Archivierung, wünschenswert, was auch den Arbeitsaufwand verringern wird.

### 3.5 Berücksichtigte Daten

Die zur Verfügung gestellten Daten für die einzelnen Projektgebiete wurden ausführlich im dritten Zwischenbericht [32] Kapitel 2.4 beschrieben, so dass im Folgenden nur eine kurze Übersicht über diese Daten gegeben wird.

Für das Gebiet der Ostfriesischen Inseln standen zum einen großflächige Echolotmessungen zur Verfügung, welche jahresweise zusammengefügt waren. Zum anderen wurden Profilvermessungen für die Inseln Langeoog und Juist zusammengestellt, die zum Teil einen Zeitraum von den 1930iger Jahren bis heute abdecken. Die Strukturinformation dieser Profile ist erhalten geblieben. Weiterhin wurden anthropogene Eingriffe für die Inseln Langeoog, Juist und Norderney zusammengestellt. Hierbei handelte es sich um Deiche mit ihren einzelnen Bauabschnitten und um Bühnenbauwerke bei Norderney.

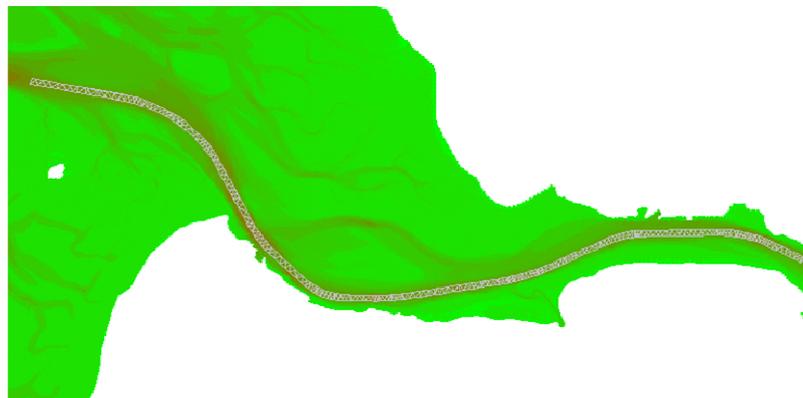


**Abbildung 16** Modul MetadataView mit einem Ausschnitt der Insel Langeoog. Es sind die einzelnen Aussagebereiche der Vermessungen in diesem Gebiet zu sehen. Darunter die Profilmessungen und der Deich als anthropogener Eingriff.

Im Bereich der Dithmarscher Bucht existieren zum Großteil historische Daten, welche aus der Digitalisierung von Isolinien gewonnen wurden und einen Zeitraum von 1935 bis 2001 abdecken. Die Strukturinformationen konnten zum Teil rekonstruiert werden. Für die anthropogenen Eingriffe wurden zum einen, aus in den Daten sichtbaren

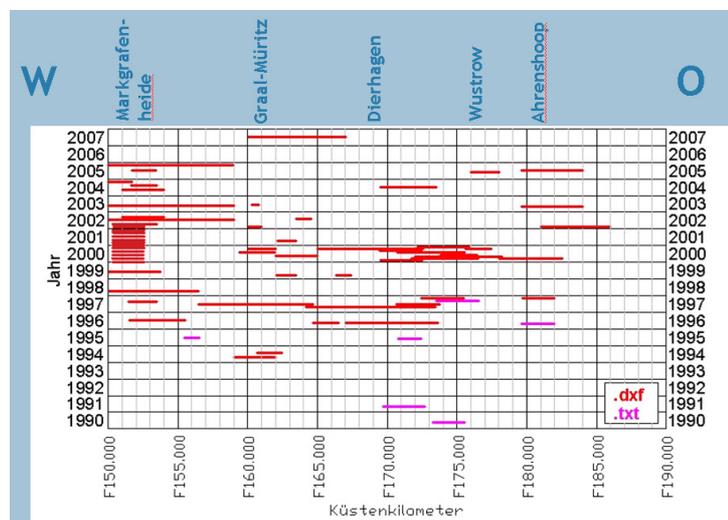
Tiefensprünge, Baggerstellen rekonstruiert und zum anderen aus vorhandenen Küstenlinien ein Modell für den Deich im Bereich der Meldorfer Bucht abgeleitet (Abbildung 15).

Die Daten aus dem Bereich der Elbe decken einen Zeitraum von 1983 bis 2007 ab. In diesen Daten waren in einer Vielzahl von Vermessungen Fehlstellen zu erkennen. Diese wurden zum Teil per Hand aufgearbeitet. Um eine schnelle und effiziente Interpolation auf den Daten zu ermöglichen, wurden sie zusätzlich trianguliert in der Datenbank abgelegt. Da diese Datenaufbereitung einen sehr hohen Zeitaufwand in Anspruch nahm, konnten aus diesem Gebiet bisher noch nicht alle Daten in der Datenbank abgelegt werden. Als anthropogener Eingriff steht bisher ein Baggerpolygon für die Elbe zur Verfügung, in dessen Bereich die Elbe auf einer konstanten Tiefe von 14,4 m gehalten wird.



**Abbildung 17** Modell für den anthropogenen Eingriff der Fahrrinnenanpassung in der Elbe.

Bei den Daten in der Ostsee für das Gebiet von Rostock bis zum Darßer Ort, handelt es sich um Profilmessungen und um drei digitalisierte Karten des Seehydrographischen Dienstes aus den 50er, 60er und 70er Jahren. Die Strukturinformation der Profile musste mit Hilfe der automatischen Strukturerkennung rekonstruiert werden. Bei den digitalisierten Karten wurden Tiefenlinien gespeichert, so dass hier die Isolinien erhalten geblieben sind.



**Abbildung 18** Vermessungsdaten im Bereich zwischen Rostock und Darßer Ort.

Die Datenlage in diesem Bereich erwies sich als relativ schlecht. In Abbildung 18 sind die einzelnen zur Verfügung stehenden Vermessungen über Zeit und Ort dargestellt. Nur ein kleines Gebiet bei Markgrafenheide besitzt eine annähernd ausreichende Datenlage über mehrere Jahre hinweg. Als anthropogene Eingriffe standen in einigen Dateien zusätzlich Polygone für Bühnen, Uferlinien und Dünenverläufe zur Verfügung. Da diese aber zum Teil nicht widerspruchsfrei sind und nicht automatisiert ausgelesen werden konnten, wurden diese Daten nicht weiter berücksichtigt.

## 4 Datenaufbereitung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden zunächst Seevermessungsdaten aus dem Küstenvorfeld der Deutschen Bucht und Bereichen der Ostsee gesichtet, auf Plausibilität geprüft und hinsichtlich ihrer Eignung für die morphologischen Untersuchungen bewertet. Ziel dieses Arbeitsschrittes war es, alle verfügbaren aussagekräftigen Vermessungsdaten in entsprechende Projektdatenbanken zu übernehmen.

Aufgrund der zahlreichen zur Verfügung stehenden Datenformate mussten verschiedenste Importfilter implementiert und Daten aus Binär-Formaten in Ascii-Formate überführt werden.

Die Metadaten der zur Verfügung stehenden Daten entsprachen in der Regel nicht ganz den gewünschten Anforderungen und waren zum Teil in den Datumsangaben, den Angaben des Koordinatensystems, des Höhensystems und der Strukturinformation nicht vollständig und widerspruchsfrei. Hier musste zum Beispiel entschieden werden, wie die Daten zu tagesgenauen Vermessungen zusammengefügt werden konnten. Ebenso kam es dadurch bei der Zuweisung von Strukturen zu Fehlern, welche zum Teil durch mühsame Handarbeit behoben werden mussten.

Bei den Vermessungsdaten zeigte sich immer wieder, dass Messwerte auftraten, deren Tiefe deutlich von der umgebenden Tiefe abwich. Solche Ausreißer können z. B. durch Schraubenwasser oder Bewuchs örtlich verstärkt auftreten. Mit der flächenhaften Plausibilisierung von Peildaten beschäftigte sich unter anderem schon [28].

Um den Anwendern zukünftig eine Plattform zur Datenaufbereitung zur Verfügung zu stellen, wurde das Modul *DataValidation* entwickelt (siehe auch Kapitel 10). Die Grundlagen für die Methoden zur Validierung und Plausibilisierung der Daten und Erkennung von Strukturinformationen werden im Folgenden vorgestellt.

### 4.1 Validierung und Plausibilisierung

Für den Aufbau von digitalen Bathymetrien in Raum und Zeit ist es notwendig, sowohl die Metadaten als auch die eigentlichen Vermessungsdaten zu validieren, zu vervollständigen und unter Umständen zu korrigieren. Es wurde versucht, eine möglichst vollautomatische Fehlerkorrektur zu ermöglichen, welche jedoch in der Regel nicht möglich ist. Für ein optimales Ergebnis müssen die Indikatoren zur Fehlersuche vom Anwender variiert werden. Ebenso muss die Metadateneingabe durch einen Anwender kontrolliert und abgestimmt werden. Hierzu wurde zur Datenaufbereitung das Modul *DataValidation* implementiert.

#### 4.1.1 Metadaten

Metadaten beschreiben die eigentlichen Vermessungsdaten. Im Rahmen des Projektes sind insbesondere die erweiterten Angaben in den Metadaten von zentraler

Bedeutung. Durch diese können beispielsweise der Konfidenzbereich der Vermessungen als auch die geeigneten Interpolationsmethoden festgelegt werden. Unstimmigkeiten in den Metadaten können zu einer fehlerhaften Interpretation der Vermessungsdaten führen. Zu den möglichen Fehlerquellen gehören beispielsweise

- falsche bzw. fehlende Datumsangabe
- falsche bzw. fehlende Angabe der Vermessungsart
- Gebietsbezeichnung stimmt nicht mit der Lage der Daten überein
- Angabe des falschen Koordinatensystems.

Die formale Korrektheit und Vollständigkeit kann automatisch geprüft werden, jedoch nicht die inhaltliche. Hier entsteht immer wieder manueller Aufwand zur Überprüfung und Ergänzung der Metadaten.

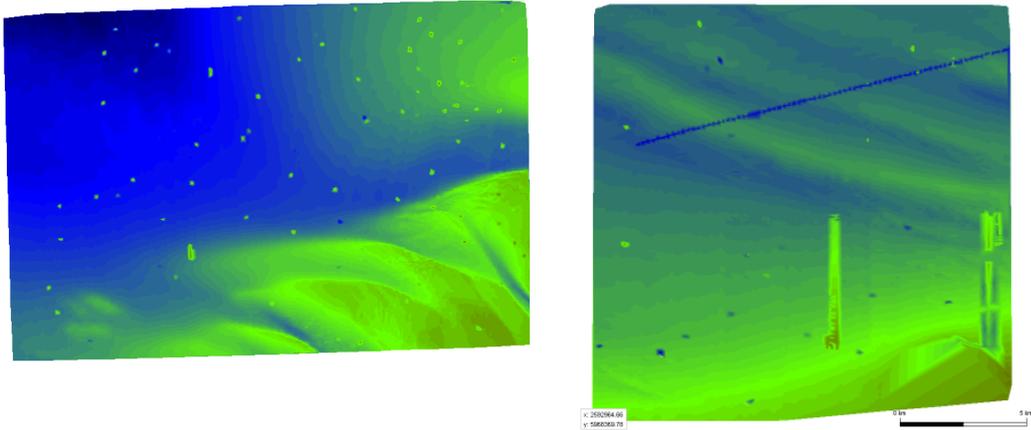
### 4.1.2 Vermessungsdaten

Unstimmigkeiten in den Vermessungsdaten können beispielsweise sein:

- identische Punkte innerhalb einer Vermessung
- lagegleiche oder annähernd lagegleiche Punkte innerhalb einer Vermessung mit unterschiedlichen Vermessungstiefen
- einzelne oder mehrere beieinander liegende Messwerte, deren Tiefe stark von der Tiefe der umgebenden Messwerte abweicht
- Ausscheren von Punkten aus einer Profilmessung
- Sprünge in der Tiefe bei etwa zeitgleichen, räumlich angrenzenden unterschiedlichen Vermessungen
- Sprünge in der Tiefe bei zeitlich variierenden Vermessungen am gleichen Ort.

Die ersten beiden Fehlerquellen können relativ einfach beim Einlesen der Daten identifiziert und behoben werden. Hierzu ist jedoch Rechenzeit nötig, um Punkte auf Lagegleichheit zu testen. Identische Punkte können markiert und für weitere Betrachtungen nicht mehr berücksichtigt werden. Haben die lagegleichen Messwerte jedoch unterschiedliche Tiefen, muss über benachbarte Messwerte die geeignete Tiefe ermittelt werden.

Da in mehreren Datensätzen vermehrt Messpunkte auftraten, deren Tiefe deutlich von der umgebenden Tiefe abwich, schien es ratsam, solche Messwerte nach Möglichkeit automatisch zu erkennen und zu korrigieren. Um dies zu ermöglichen, sollten sich die Parameter zur Korrektur aus den Daten selbst ableiten lassen. Hierzu wurden an zwei beispielhaften Gebieten verschiedene Kriterien erarbeitet. Die Gebiete sind in Abbildung 19 gezeigt. Die Fehlstellen sind deutlich erkennbar.



**Abbildung 19** Gebiet 1 (links) und Gebiet 2 (rechts) zur Entwicklung von Kriterien zur automatischen Fehleridentifikation

### Methoden

Als eine Möglichkeit zur Fehleridentifizierung können statistische Verfahren dienen. Die Standardabweichung  $\sigma$  (Gl. 4-2) ist ein Maß für die Streuung der Werte einer Zufallsvariablen um ihren Mittelwert  $\mu$  (Gl. 4-1).

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Gl. 4-1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad \text{Gl. 4-2}$$

Wird davon ausgegangen, dass in einem gewissen Bereich um einen Messwert herum nur ähnliche Tiefen auftreten, sollte es sich bei Werten, welche um ein Vielfaches der Standardabweichung von der mittleren Tiefe abweichen, um Ausreißer  $\alpha$  handeln (Gl. 4-3). Diese Methode wurde als eine erste Möglichkeit zur Fehleridentifizierung umgesetzt und auf Grund ihrer Schnelligkeit, auch bei einer großen Anzahl von Messwerten, mit in die *DataValidation* mit der Methode *SinglePoint* integriert. Der Parameter  $f$  kann dort vom Anwender frei vorgegeben werden.

$$\text{wenn } |z - \mu| > \sigma \cdot f \text{ dann } \alpha \quad \text{Gl. 4-3}$$

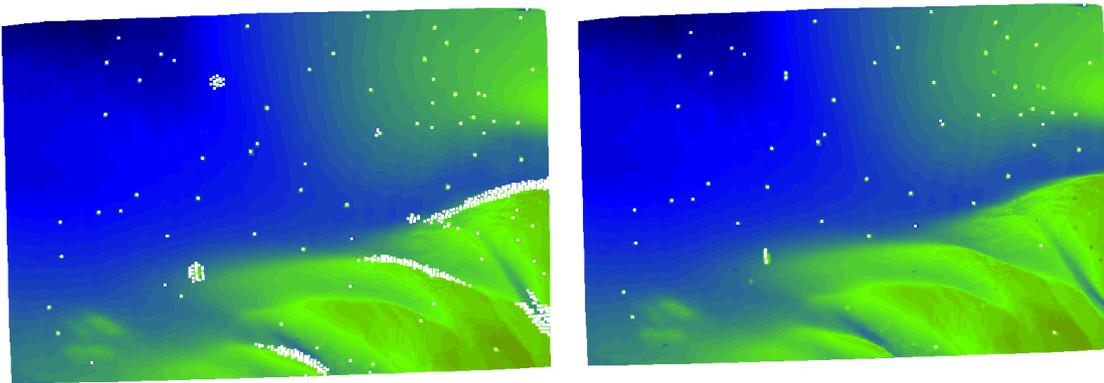
Einzelne Ausreißer können mit dieser Methode recht gut erkannt werden. Nachteilig ist jedoch, dass der Faktor  $f$  sehr groß gewählt werden muss, um nicht zu viele korrekte Punkte zu markieren. Im Gegenzug werden so allerdings nicht mehr alle Ausreißer identifiziert. Liegen mehrere Ausreißer beieinander versagt die Methode vollständig.

Für diese und auch alle nachfolgenden Betrachtungen wurde die Bewertung eines Messwertes immer in Bezug zu seinen nächsten Nachbarn durchgeführt. Die Anzahl der Nachbarn sollte nicht zu klein aber auch nicht zu groß gewählt werden. Im ersten Ansatz wurden jeweils die nächsten 20 Nachbarn bzw. die nächsten Nachbarn, welche sich aus einer Triangulation oder Rasterstruktur ergeben, hinzugezogen. Bezüglich der „perfekten“ Anzahl können weitere Studien durchgeführt werden. Zum

Beispiel könnte zwischen Gebieten mit starker oder geringer Geländevariabilität oder solchen Gebieten mit hoher oder geringer Datendichte unterschieden werden.

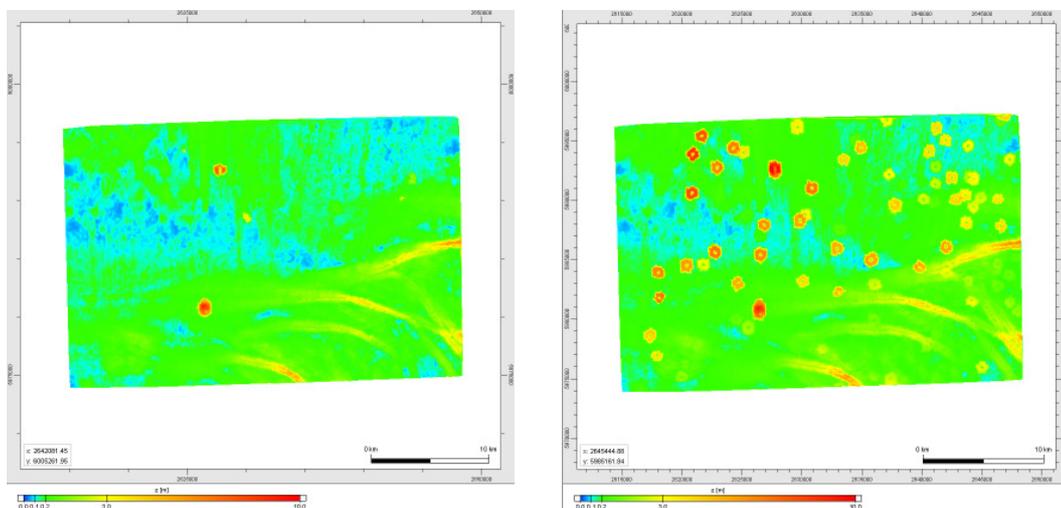
### Methode 2

Eine bessere Möglichkeit als die Beurteilung über die absoluten Tiefen, stellt die Bewertung über die mittlere Differenz der Tiefe  $\mu_{\Delta z}$  eines Punktes zu seinen Nachbarn dar. Diese sollte bei einem fehlerhaften Punkt relativ groß sein. Anders als bei der ersten Methode haben benachbarte fehlerhafte Messwerte so deutlich weniger Gewicht. Auch hier ist die Wahl einer Grenze jedoch schwierig. Vor allem im Bereich starker Geländevariabilität kann es zu vielen Fehlidentifizierungen kommen. (Abbildung 20)



**Abbildung 20** Fehlerhaft identifizierte Werte bei einer mittleren Tiefendifferenz zu den benachbarten Messwerten von größer 3m (links) und größer 10m (rechts). Entweder werden zu viel gute Punkte im Bereich großer Geländevariabilität selektiert (links) oder es werden nicht alle fehlerhaften Messwerte selektiert.

Das Hinzuziehen der Standardabweichung  $\sigma$  bietet keine Möglichkeit die Fehleridentifikation zu verbessern. In Abbildung 21 ist die Standardabweichung der mittleren Tiefendifferenz dargestellt. Dabei wurden, im Gegensatz zur rechten Abbildung, in der linken Abbildung jeweils die Werte mit der kleinsten und größten Tiefe nicht in die Mittelwertsbildung einbezogen. So treten im ersten Fall keine großen Varianzen im Bereich einzelner Peaks auf. Da es vor allem im Bereich größerer Gradienten Probleme mit der Fehleridentifikation gibt, stellt die

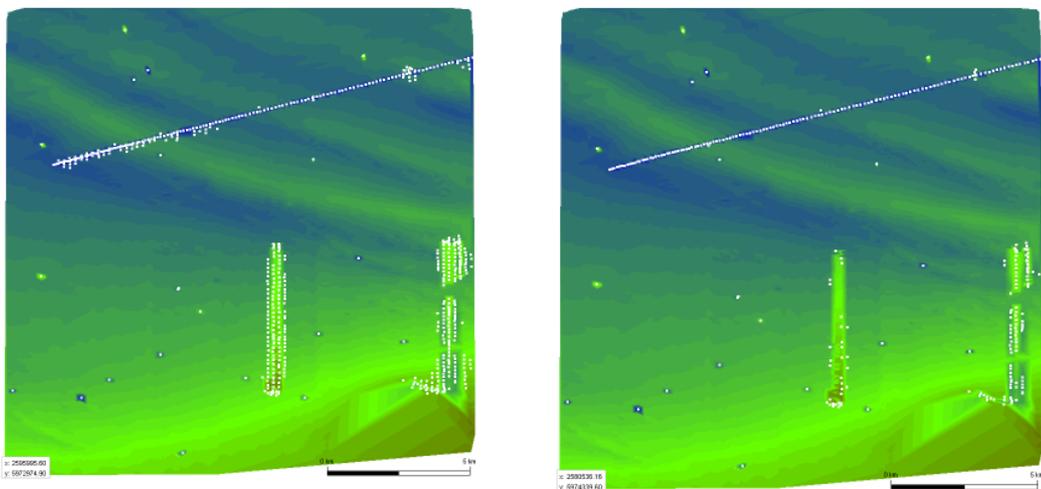


**Abbildung 21** Standardabweichung ohne Extremwerte (links) und mit Extremwerten (rechts)

Standardabweichung, z. B. durch eine Kombination großes  $\mu_{\Delta z}$  und kleines  $\sigma$ , kein zusätzliches Hilfsmittel dar. Fehlinterpretierte Punkte können in diesem Bereich so zwar zum Teil ausgeschlossen werden, jedoch werden die fehlerhaften Werte in diesen Bereichen ebenfalls nicht mehr erkannt.

Um das Ergebnis zu verbessern, wurden daher der betrachtete Punkt und seine Nachbarwerte nach ihrer Tiefe in einer Liste sortiert. Fehlerhafte Punkte sollten sich in der Regel immer im Anfangs- oder Endbereich der Liste befinden, da sie einen minimalen oder maximalen Wert im betrachteten Bereich annehmen. Durch diese Einsortierung können auch mehrere fehlerhafte Messwerte nebeneinander berücksichtigt werden. Ist der große Tiefensprung  $\mu_{\Delta z}$  nicht auf einen fehlerhaften Messwert, sondern auf große Tiefengradienten zurückzuführen, sollte der betrachtete Punkt eher in der Mitte der Liste zu finden sein. Ausnahme stellen dabei wieder Bereiche dar, in denen mehrere Fehlstellen nebeneinander liegen.

Im Gebiet 1 konnte dadurch die Anzahl der markierten Punkte von 558 auf 182 reduziert und das Ergebnis deutlich verbessert werden. Allerdings werden, wie am Gebiet 2 in Abbildung 22 zu sehen ist, in Bereichen, in denen lange breite Plateaus auftreten, immer noch nicht alle Fehlstellen erkannt. Diese Methode wurde im Modul *DataValidation* unter *fehler2* implementiert. Vom Anwender können die Parameter „Grenze für die zulässige Abweichung der Tiefe zu den Nachbarwerten in Metern“ und „die Position in der Liste“ vorgegeben werden.

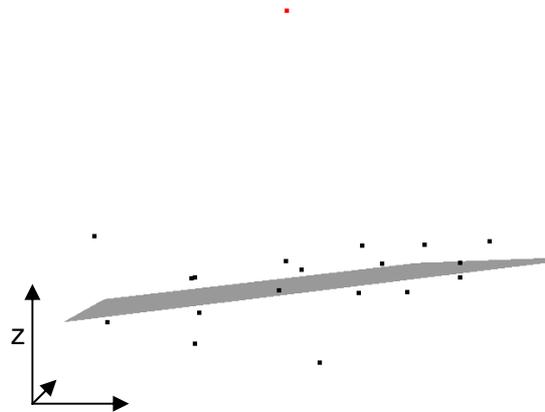


**Abbildung 22** Reduzierung der als fehlerhaft markierten guten Messwerte in Bereichen starker Geländevariabilität. Die Methode reicht jedoch nicht aus, alle Fehlstellen im Bereich von Ansammlungen fehlerhafter Werte zu identifizieren.

### **Methode 3**

Um auch in Bereichen größerer Geländevariabilität eine gute Fehleridentifikation zu erzielen, wird nun nicht mehr die Tiefendifferenz des Punktes zu seinen Nachbarn bewertet, sondern der Abstand zu einer Ausgleichsfläche, welche durch die benachbarten Messwerte gelegt wird. Um Verfälschungen bei der Ebenenbestimmung durch fehlerhafte Punkte zu reduzieren, wird jeweils der größte und kleinste Tiefenwert nicht mit einbezogen.

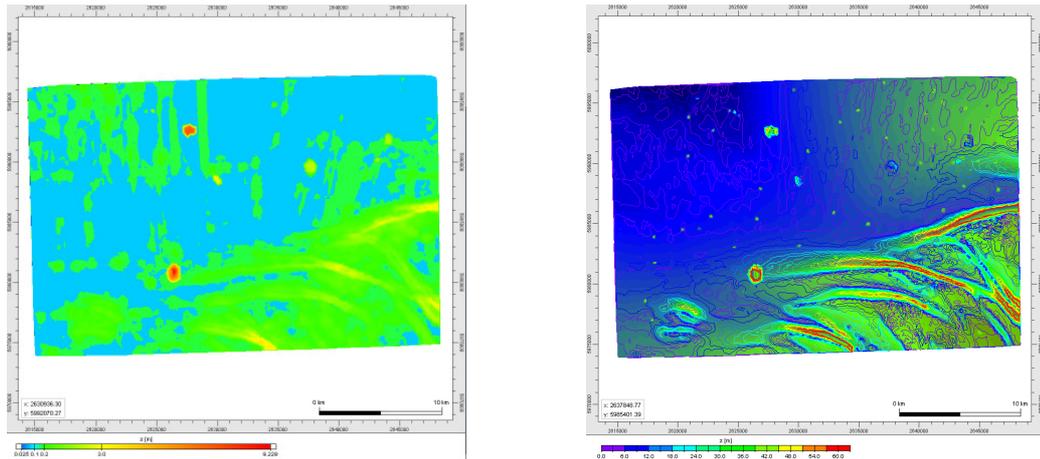
Da die  $x$ - $y$ -Koordinaten eine andere Größenordnung besitzen als die Messtiefen würden sich nur sehr geringe Winkel für die Neigung der Ausgleichsebene ergeben, daher werden die Werte entsprechend skaliert.



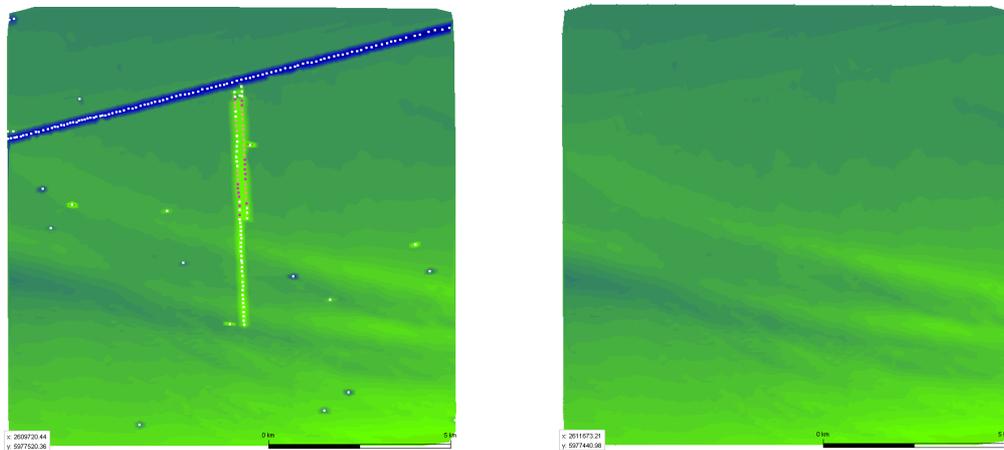
**Abbildung 23** Regressionsebene durch eine Anzahl von Messpunkten

Mit dieser Methode werden, allerdings mit einem recht großen Zeitaufwand, auch die einzelnen Messfehler in Bereichen mit größerer Geländevariabilität gut erkannt (*DataValidation* Methode: *fault3*). Als einziger Problembereich bleibt somit eine große Anhäufung von Messfehlern. Wird erneut die Standardabweichung betrachtet, zeigt sich, dass sich durch die Ausgleichfläche, wie gewünscht, die Werte im Bereich größerer Gradienten verringert haben. Besonders große Standardabweichungen treten nur noch im Bereich der Plateaus auf. Dies ist im Vergleich in *Abbildung 24* und *Abbildung 21* zu sehen. Da es schon im Übergangsbereich zu den Plateaus zu erhöhten Standardabweichungen kommt, reicht diese als alleiniges Kriterium nicht aus, wenn nicht unnötig viele gute Messwerte im Grenzbereich gelöscht werden sollen. Als zusätzliches Kriterium wurde daher noch der Winkel der Ausgleichsfläche zur  $x$ - $y$ -Ebene hinzugezogen. Dieser ist direkt auf den Plateaus gering (*Abbildung 24*). Als Kriterium ergibt sich so, dass die Messwerte fehlerhaft sind, wenn ihre Standardabweichung entsprechend groß und der Winkel der Ausgleichsfläche entsprechend klein ist (*DataValidation* Methode: *fault4*).

Für ein optimales Ergebnis sollten die beiden Methoden daher kombiniert ausgeführt werden (*DataValidation* Methode: *komplex*, *Abbildung 25*). Über den Abstand des Punktes zur Ebene werden zuerst die fehlerhaften Einzelwerte gefunden. Durch die Bedingung an die Standardabweichung und den Winkel der Ebene wird der Großteil der Messfehler im Bereich der Plateaus identifiziert. Die letzten Messfehler werden dann durch nochmaliges Anwenden der ersten Methode ermittelt. Die als fehlerhaft identifizierten Punkte können dann, je nach Datenstruktur, nicht weiter berücksichtigt werden, oder es wird ihnen aus der Umgebung eine interpolierte Tiefe als Alternative zugewiesen.



**Abbildung 24** Standardabweichung mit Regressionsebene (links) und Neigungswinkel der Regressionsebene (rechts)



**Abbildung 25** Interpolierte Gewässersohle mit fehlerhaften Daten (links) und fehlerbereinigt (rechts). Die weißen Punkte kennzeichnen die zuerst gefundenen Messfehler über das Abstandskriterium. Die orangefarbenen Punkte die, welche im zweiten Durchlauf für eine Standardabweichung größer 3 m und einem Winkel kleiner  $60^\circ$  selektiert wurden und die weinroten diese die durch nochmaliges Anwenden der ersten Methode im dritten Durchgang selektiert wurden.

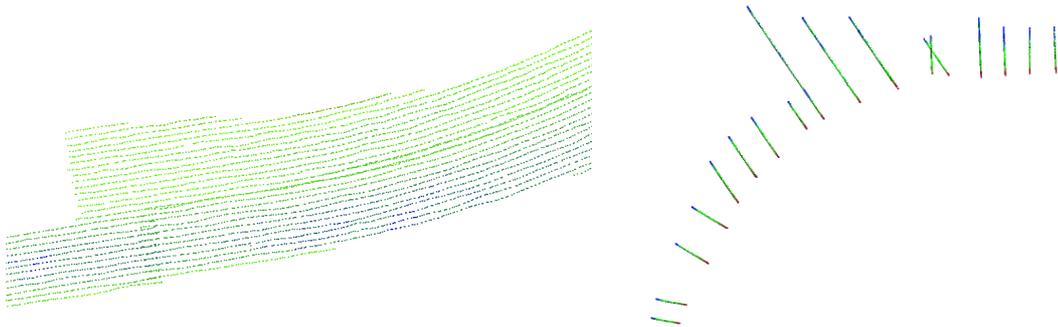
Angestrebt war es, für die Identifizierung solcher Ausreißer keine festen Werte für die entwickelten Kriterien vorgeben zu müssen, sondern diese direkt aus den Messdaten abzuleiten. Hierzu wurden erste Versuche durchgeführt. Unter anderem wurden dazu mit Werten zur Vermessungsdichte und maximal mögliche Tiefenänderung abhängig vom Sediment experimentiert. Da die Fehlerkorrektur nur eine Randaufgabe des ImTG-Projektes war, wurden diese Betrachtungen nicht weiter geführt.

Sprünge in der Zeit, welche auf Fehler in den Messdaten zurückzuführen sind und nicht auf natürliche morphologische Veränderungen, sind sehr schwer zu identifizieren. Daher wurden diese im Rahmen des Projektes nicht weiter betrachtet

### 4.2 Automatische Strukturerkennung und -rekonstruktion

Für die Vermessung des Seebodens werden unterschiedliche Messverfahren und -techniken eingesetzt, die sich stetig weiterentwickeln. Unterschiedliche Mess-

anforderungen bzw. -verfahren führen zu unterschiedlichen Strukturen in den Vermessungsdaten selbst. Profilvermessungen, digitalisierte Isolinien aus historischen Karten aber auch Single-Beam-Echolot-Vermessungen führen beispielsweise zu linienhaften Strukturen in den Vermessungsdaten. Laserscan- und Echolotvermessungen werden häufig in regelmäßige Raster überführt. Liegen die Vermessungspunkte unregelmäßig angeordnet vor, so können durch Triangulation der Daten zusätzliche Strukturinformationen aufgeprägt werden. Die Kenntnis über die Struktur der Vermessungsdaten ermöglicht es unter anderem, besonders geeignete Verfahren zur Interpolation oder Datenhaltung einzusetzen.



**Abbildung 26** Datenstrukturen aus Linienpeilungen in der Elbe und Profilmessungen bei Langeoog

Sind diese speziellen Informationen über die Struktur der Vermessungsdaten während des Prozessing bzw. der Datenarchivierung verloren gegangen, müssen diese algorithmisch wiedererkannt werden. Daher wurden im Rahmen des Projektes Verfahren für die Strukturfindung von linienhaften und rasterbasierten Vermessungsdaten implementiert [31].

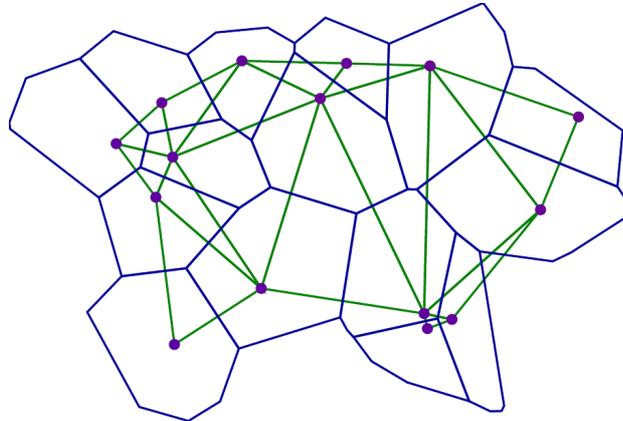
### 4.2.1 Nachbarschaften

Um kontinuierliche, lückenlose Strukturen identifizieren zu können, ist es wichtig, bestimmen zu können, welche Punkte in der Nähe eines anderen Punktes liegen, also welche Punkte benachbart sind.

Bei einer unstrukturierten Datenmenge kann zur Festlegung von Nachbarschaften zum Beispiel der Abstand herangezogen werden. Alle Punkte, die innerhalb eines Radius  $r$  um den betrachteten Punkt liegen, werden als zu diesem Punkt benachbart bezeichnet. Diese Methode ist jedoch sehr zeitaufwändig und nicht besonders praktikabel.

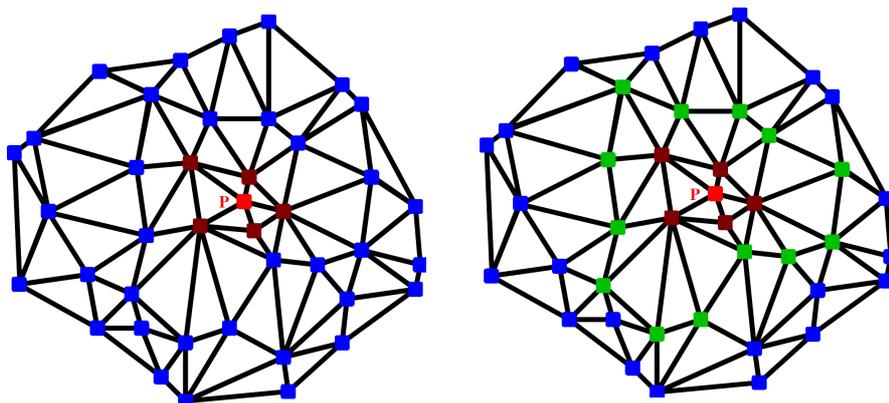
Eine andere Möglichkeit besteht darin, die noch beliebig angeordneten Daten durch Triangulieren zu strukturieren. Bei der Delaunay-Triangulation wird ein Netz aus überschneidungsfreien Dreiecken erzeugt. Innerhalb des Umkreises eines dieser Dreiecke dürfen dabei nur die Eckpunkte des Dreieckes liegen. Analog zur Delaunay-Triangulation gibt es das Voronoi-Diagramm, das sich dual zur Triangulation verhält. Das Voronoi-Diagramm beschreibt dabei eine Zerlegung der Fläche in Regionen, die durch eine Menge von Punkten, hier den Messpunkten, bestimmt wird. Jede Region wird dabei durch genau einen Messpunkt bestimmt und umfasst alle Punkte einer

Fläche, die näher am betrachteten als an jedem anderen Messpunkt liegen. Die Dualität ergibt sich aus der Tatsache, dass die Grenzen der Regionen senkrecht auf den Dreieckskanten liegen sowie daraus, dass die Schnittpunkte der Grenzen der Voronoiregionen mit den Mittelpunkten der Umkreise der entsprechenden Dreiecke zusammenfallen.



**Abbildung 27** Dualität von Delany-Triangulation (grün) und Voronoi-Diagramm (blau)

Mit Hilfe dieser Strukturierung lassen sich sehr einfach und effizient Nachbarschaften bestimmen. Zwei Vermessungspunkte heißen benachbart, wenn die Voronoi-Regionen eine gemeinsame Grenze haben. Aus der Dualität von Voronoi-Diagramm und Delaunay-Triangulation folgt, dass zwei Messpunkte benachbart sind, wenn sie durch eine Kante verbunden sind. Wenn zwei Punkte direkt benachbart sind, wird ein Punkt als Nachbar erster Ordnung des anderen bezeichnet. Nachbarn zweiter Ordnung sind wiederum die Nachbarn erster Ordnung zu diesen Punkten (siehe Abbildung 28).



**Abbildung 28** Nachbarn erster Ordnung (links) und Nachbarn zweiter Ordnung (rechts) in einer Triangulation.

Im Folgenden wurden zur Bestimmung von Nachbarschaften zur Strukturerkennung nur triangulierte Datensätze verwendet.

#### 4.2.2 Linienerkennung

Eine erkennbare Struktur in den Daten sind linienartige Anordnungen von Punkten, die beispielsweise durch Single-Beam-Echolotung entstehen. Ziel der Linien-

kennung ist es dabei, Punkte zu geordneten Mengen zusammenzufassen. Die Punkte einer Menge sollen dabei einen zusammenhängenden, stetigen, möglichst geraden, nicht verzweigten Streckenzug bilden.

Die einfachste Methode eine solche Menge zu finden, ist, sich einen (beliebigen) Startpunkt zu suchen und davon ausgehend denjenigen Nachbarn zu ermitteln, der die oben geforderten Kriterien optimal erfüllt. Von diesem gefundenen Punkt aus wird anschließend erneut der nächste Punkt der Linie ermittelt und einer entsprechenden Liste hinzugefügt. Diese Methode wird so lange wiederholt, bis kein geeigneter Kandidat zur Fortführung des Streckenzuges gefunden werden kann.

Durch das Wählen eines beliebigen Startpunktes wird mit der Identifikation einer Linie mit hoher Wahrscheinlichkeit in der Mitte der Linie begonnen. Wenn die Linie dann nur in eine Richtung verfolgt wird, erhält man mehrere unabhängige Teilstücke statt einer durchgehenden Linie (Abbildung 29 links). Um dieses Problem zu umgehen, folgt man der Linie nicht nur in eine Richtung bis zum Ende, sondern setzt die Suche anschließend am Startpunkt in genau entgegengesetzter Richtung fort. So ergibt sich das erwartete Bild (Abbildung 29 rechts).



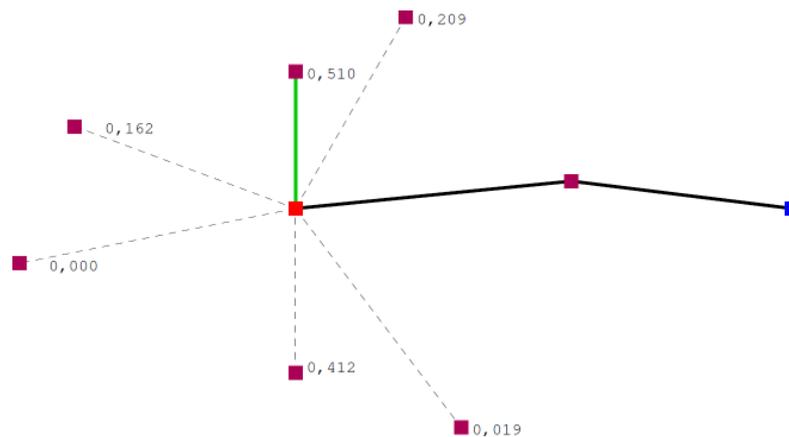
**Abbildung 29** Suche der Nachbarn zur Linienfortführung in einer Richtung (links) und mit Richtungsumkehr (rechts). Die grünen Punkte markieren jeweils den Startpunkt.

Zur Bewertung der Eignung eines Nachbarpunktes zur Fortführung der aktuell betrachteten Struktur, wird jedem Nachbarn ein Gewicht aus dem Intervall  $]0,1[$  zugewiesen. Ein größerer Wert ist dabei ein Indikator für einen besser geeigneten Punkt. Ein Wert von 0 bedeutet demzufolge, dass ein Nachbar nicht geeignet ist, die Struktur fortzuführen. Für den konkreten Anwendungsfall sind insbesondere die beiden Kriterien zur Auswertung des Abstandes und der Richtung, die im Folgenden erläutert werden, von Interesse.

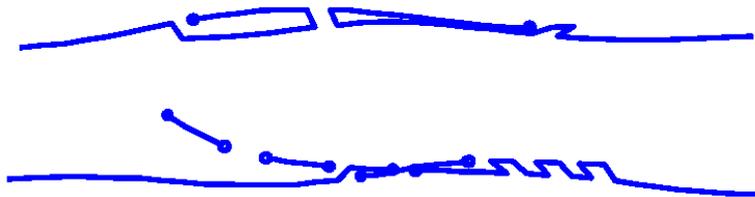
### **Abstandskriterium**

Eine Möglichkeit besteht darin, die Abstände der Nachbarpunkte zum betrachteten Punkt zu ermitteln und zu normalisieren. Dabei wird die Normung so vorgenommen, dass dem am weitesten entfernten Punkt der Wert 0 zugewiesen wird. Ein Kandidat ist ungeeignet, wenn dessen Abstand vom aktuellen Punkt um einen festzulegenden Faktor vom Abstand des aktuellen Punktes zum Vorgängerpunkt abweicht. Mit Hilfe dieser Methode lassen sich relativ freiliegende, recht gleichmäßig angeordnete Punkte einer Linie zuordnen. In Abbildung 30 sind die Ergebnisse dieser Funktion beispielhaft dargestellt. Die dicker dargestellten Strecken stellen dabei die schon gefundene Linie dar. Die grüne Strecke ist die mit Hilfe dieser Funktion ausgewählte Fortführung der Linie. Wie zu erkennen ist, reicht es nicht aus, nur den Abstand zu betrachten, da die Linie in diesem Beispiel abknicken würde. Die Auswirkungen bei realen Messdaten sind in Abbildung 31 ersichtlich.

Weiterhin ist diese Funktion nicht ausreichend, wenn kreuzende oder nahe beieinander liegende Linien erkannt werden sollen.



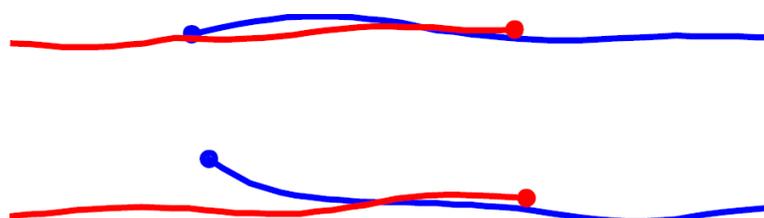
**Abbildung 30** Gewichte aus der einfachen Abstandsbetrachtung



**Abbildung 31** Ergebnis der einfachen Abstandsbetrachtung bei einer Linienpeilung des NLWKN vor Norderney

### Richtungskriterium

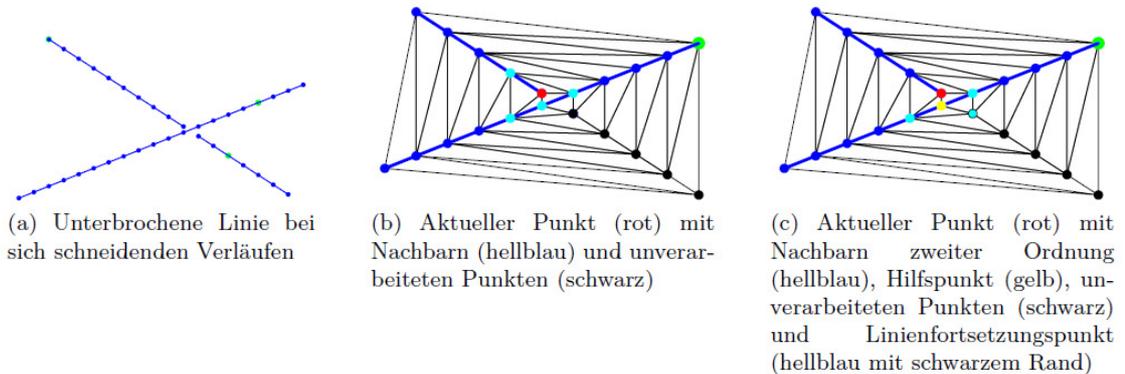
Für die Forderung nach einem möglichst geraden Streckenzug muss die Richtung, in die der Streckenzug wächst, beachtet werden. Dabei wird zunächst der Richtungsvektor vom vorletzten zur Linie hinzugefügten Punkt zum zuletzt der Linie hinzugefügten Punkt gebildet. Anschließend werden die Richtungsvektoren zu allen relevanten Nachbarn des betrachteten Punktes gebildet. Danach werden die Winkel zwischen den Vektoren zu den Nachbarn und dem Referenzvektor berechnet. Der sich ergebende Winkel aus dem Intervall  $[0, \pi]$  wird anschließend auf das Intervall  $[1, 0]$  skaliert. Ungeeignet ist ein Nachbarpunkt, wenn der Winkel größer als ein festgelegter, experimentell zu ermittelnder Wert ist. Diese Funktion lässt sich erst anwenden, wenn bereits mindestens zwei Punkte der Linie zugeordnet wurden oder die Richtung der Linie als Startbedingung, beispielsweise aus der Richtung der Nachbarlinie, vorgegeben wurde. Da die Werte für Abstands- und Richtungs-betrachtung normalisiert wurden, können die verschiedenen Kriterien einfach kombiniert werden. Wird zusätzlich das Richtungskriterium hinzugezogen, lassen sich auch kompliziertere Linienanordnungen, wie in Abbildung 32 zu sehen, zuverlässiger erkennen.



**Abbildung 32** Daten wie in Abbildung 31 mit Richtungskriterium

### Kreuzungen überspringen

Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich bei sich kreuzenden Linien. Bei ungünstiger Triangulation werden statt erwarteten zwei Linien, drei Linien erkannt (Abbildung 33). Diese Situation entsteht, da durch die durchlaufende Linie keine unverarbeiteten Punkte mehr als direkte Nachbarn des aktuell betrachteten Punktes zur Verfügung stehen.



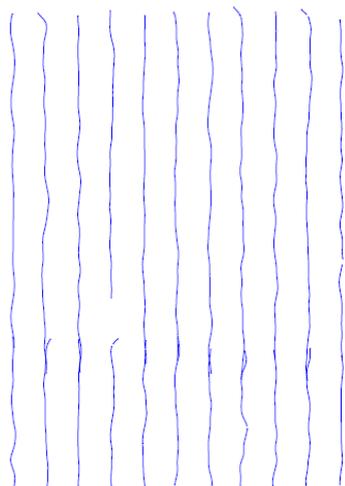
**Abbildung 33** Algorithmus zum Erkennen sich kreuzender Linien

Lösen lässt sich dieses Problem durch zusätzliches Betrachten von Nachbarn zweiter Ordnung. Da die Betrachtung aller Nachbarn zweiter Ordnung wenig zielführend ist, werden nur diejenigen Nachbarn zweiter Ordnung betrachtet, die in der Richtung der Linienfortsetzung liegen. Dazu wird der Nachbar erster Ordnung, der dieser Richtung am Besten entspricht, als Hilfspunkt genutzt. Dabei ist es irrelevant, ob dieser Punkt bereits in eine Linie eingebunden ist oder nicht. Von diesem Hilfspunkt werden wiederum die Nachbarn bestimmt, welche Nachbarn zweiter Ordnung des Ausgangspunktes sind. Auf diese Punkte werden dann die schon beschriebenen Kriterien zur Linienfortführung angewendet.

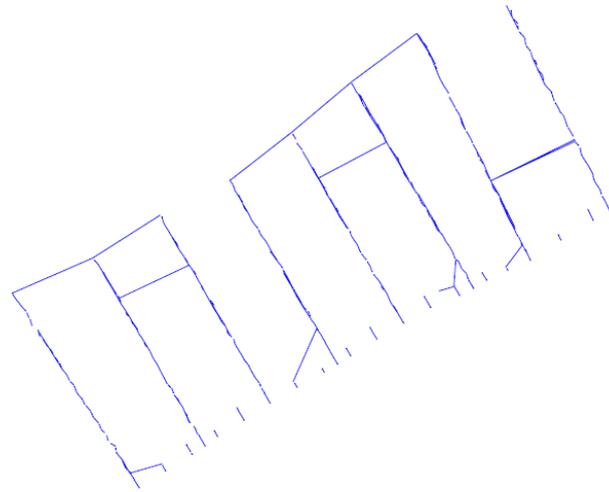
### Dynamisierung der Abbruchkriterien

Bisher wurden für die Beurteilung, ob ein Nachbarpunkt zur Linienfortführung geeignet ist, fixe, experimentell ermittelte Werte genutzt. Da es aber große Schwankungen in den betrachteten Größen geben kann und sich außerdem die real zu bearbeitenden Daten wesentlich von den zur Zeit verfügbaren Daten unterscheiden können, ist es wünschenswert, diese Grenzwerte dynamischer zu bestimmen. Dazu wird nicht nur der letzte Abstand beziehungsweise Winkel betrachtet, sondern der Verlauf. Es ist allerdings nicht der gesamte Verlauf der Linie interessant, sondern nur eine bestimmte Anzahl der letzten Werte. Einerseits ist es dadurch möglich den Speicherbedarf konstant zu halten, andererseits ist die Aussagekraft der weiter entfernt liegenden Werte für den kommenden Verlauf unerheblich. Um die Menge der relevanten Punkte beziehungsweise Werte zu verwalten, wird ein zirkulärer Speicher verwendet. Dieser hat eine feste Größe und überschreibt die ältesten Werte mit neu hinzugefügten, wenn der zur Verfügung stehende Speicherplatz komplett belegt ist.

Um nun die dynamischen Grenzen zu erhalten, müssen die Werte innerhalb des Buffers analysiert werden. Aus ihnen muss ein Bereich abgeleitet werden, in dem der nächste Punkt liegen darf. Die einfachste Methode einen solchen Bereich zu erhalten, besteht darin, den empirischen Mittelwert zu bilden und die n-fache empirische Standardabweichung abzuziehen bzw. aufzuaddieren.



(a) Ausschnitt aus Echototmessungen des NLWKN im Jahr 2002

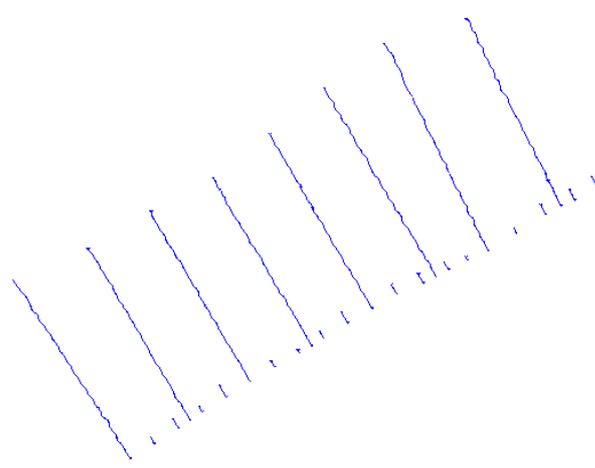
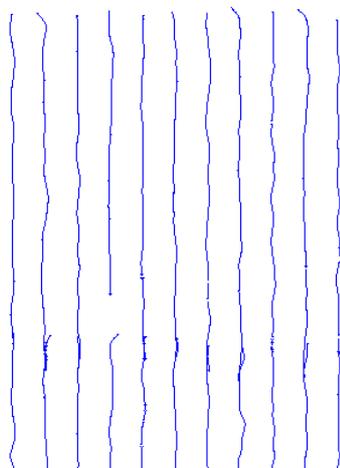


(b) Ausschnitt aus Profilmessungen des Staatlichen Amtes für Umwelt und Natur Rostock im Jahr 2007

**Abbildung 34** Ergebnis mit statischen Abbruchkriterien

In Abbildung 34 und Abbildung 35 sind die Auswirkungen dargestellt. Beide Abbildungen zeigen jeweils ein Bild aus einem Testgebiet. Auf die beiden Testgebiete in Abbildung 34 wurde die Linienerkennung mit den statischen Kriterien vorgenommen, wobei die Parameter auf das Gebiet in Abbildung 34a abgestimmt wurden. Am Ergebnis der Linienerkennung im Testgebiet in Abbildung 34b ist deutlich zu sehen, dass mit diesen Parametern nur ein ungenügendes Ergebnis erzielt wurde.

In Abbildung 35 wurden die dynamisierten Kriterien eingesetzt. Es ist erkennbar, dass so in beiden Gebieten die gewünschten Ergebnisse erzielt werden.



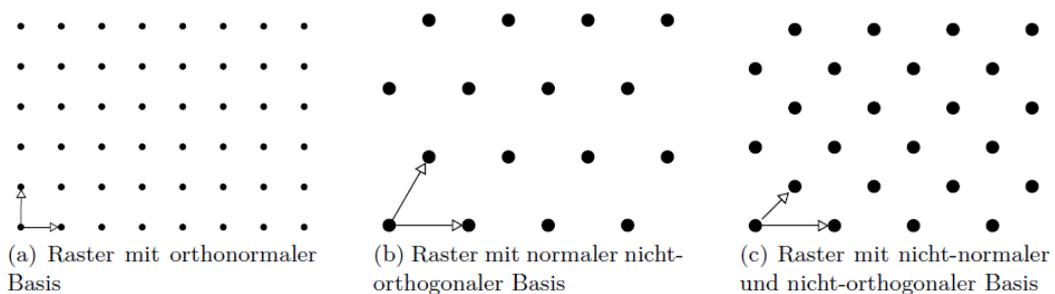
**Abbildung 35** Daten wie in Abbildung 34 mit dynamischen Abbruchkriterien.

### 4.2.3 Erkennen von regulären Rastern

Die Daten einiger Messverfahren werden zusammengefasst und dann als reguläre Raster bereitgestellt. Ebenso kann es vorkommen, dass solche gerasterte Daten, mit anderen Vermessungen, z. B. bei einer jahresweisen Zusammenführung von Daten in einer Datei zusammengefasst werden. Wenn erkennbar ist, dass die Daten bereits gerastert vorliegen bzw. gerasterte Daten mit anderen Vermessungsdaten vermischt wurden, kann durch entsprechende Indizierung schneller auf die gewünschten Daten zugegriffen sowie spezielle Interpolationen direkt angewendet werden.

Die maßgebliche Eigenschaft eines regulären Rasters ist, dass es eine feste Vorschrift gibt, mit der auf die Lage eines Punktes durch seine Nachbarpunkte geschlossen werden kann. Diese feste Vorschrift hat mit den Basisvektoren  $u$  und  $v$  im zweidimensionalen Fall die folgende Gestalt:

$$x_{ij} = \alpha_i \cdot u + \beta_j \cdot v \quad \forall \alpha, \beta \in \mathbb{Z} \quad i, j \in \mathbb{N}$$



**Abbildung 36** Arten regulärer Raster

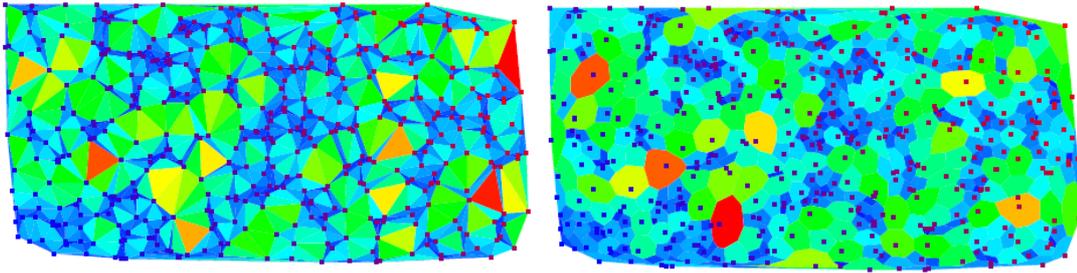
In der Abbildung 36 sind einige mögliche Ausprägungen eines Rasters dargestellt. Abbildung 36a zeigt ein Raster mit senkrecht aufeinander stehenden, gleichlangen Basisvektoren. Diese Form des Rasters ist die am häufigsten anzutreffende. In Abbildung 36b sind die Basisvektoren gleich lang, aber stehen nicht senkrecht aufeinander. In Abbildung 36c wiederum stehen die Basisvektoren weder senkrecht aufeinander noch sind sie gleich lang.

Da bei der zweidimensionalen Struktur eines Rasters im Gegensatz zur eindimensionalen Struktur einer Linie ein Punkt nicht nur einen Nachfolgepunkt besitzt, ist ein einfaches lineares Durchlaufen wie bei der Linienerkennung nicht mehr möglich. Um festzustellen, ob es sich um ein Raster handelt, wurden die folgenden Bewertungsfunktionen entworfen:

#### Bewertung mit Dichtefunktion

Eine Möglichkeit ein Raster zu erkennen, besteht darin, die Dichtefunktion, also die Anzahl der Punkte pro Fläche zu betrachten. Wenn diese in einem Bereich konstant ist, dann sind Messpunkte in diesem Bereich regelmäßig angeordnet. Die benötigte Lokale-Dichte-Funktion lässt sich mit unterschiedlichen Verfahren ermitteln. Die beiden einfachsten Methoden bestehen darin, die gegebenen Punkte zu triangulieren und entweder die Fläche der Voronoi-Regionen oder die Fläche der Delaunay-Dreiecke ins Verhältnis zu der Fläche, die das Hüllpolygon einschließt zu setzen. Dieser Wert ist dann die lokale Dichte innerhalb des Dreiecks beziehungsweise der

Voronoiregion. Für zufällig verteilte Punkte sind die Ergebnisse für die Dichte auf Basis der Dreiecke und auf Basis der Voronoiregionen in Abbildung 37 dargestellt.



**Abbildung 37** Lokale Dichtefunktion auf der Basis von Dreiecksflächen (links) und Voronoiregionen (rechts).

Zum Erkennen eines Rasters eignen sich prinzipiell beide Dichtefunktionen gleich gut, wobei die Dichte auf Basis der Voronoiregionen je nach Implementierung an den Rändern entweder unendlich große oder kleinere Werte als in der Mitte eines untersuchten Rasters aufweisen kann.

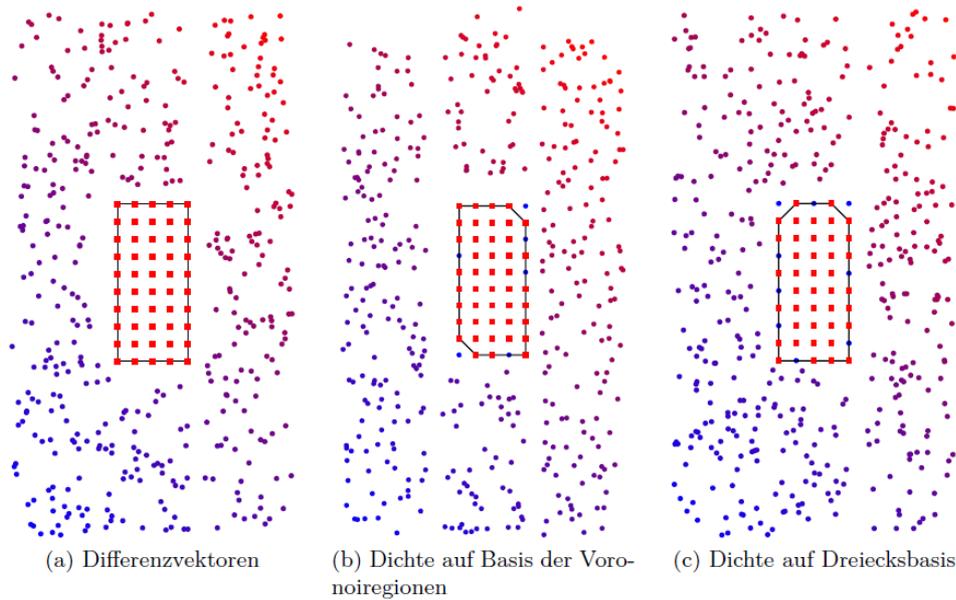
### **Bewertung durch Erkennen einer Basis**

Eine zweite Möglichkeit, eine Bewertungsfunktion zu erhalten, lässt sich aus der Definition eines Rasters ableiten. Dazu werden zunächst zwei Basisvektoren bestimmt. Nachbarn, die sich mit Hilfe einer Linearkombination mit den Faktoren 0, 1 und  $-1$  der Basisvektoren ausgehend vom aktuellen Punkt beschreiben lassen, gehören zum regulären Raster. In diesem Fall wird der Bewertungsfunktion der Wert 1 zugewiesen. Wenn dies nicht der Fall ist, besitzt die Bewertungsfunktion für diesen Nachbarn den Wert 0.

Um einen Satz linear unabhängiger Basisvektoren zu erhalten, werden wiederum alle Nachbarpunkte erster Ordnung des Startpunktes betrachtet. Dabei wird ausgehend vom Startpunkt zu je einem Nachbarpunkt der Differenzvektor gebildet. Anschließend wird der Winkel, der vom Differenzvektor und der globalen horizontalen Achse eingeschlossen wird, berechnet. Dieser Winkel wird auf den Bereich  $[-\pi/2, \pi/2]$  projiziert und anschließend der Betrag gebildet. Daraus folgt, dass alle Winkel die kleiner als  $\pi/4$  sind, zu einem Vektor mit positiver Steigung gehören und umgekehrt alle anderen eine negative Steigung aufweisen. Unter den Differenzvektoren zu Nachbarn des Ausgangspunktes wird je ein Vektor mit positiver und negativer Steigung ausgewählt. Diese sind linear unabhängig.

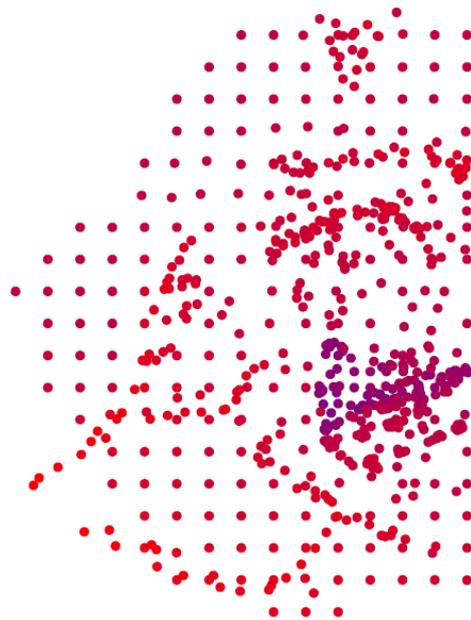
### **Ergebnis**

Sowohl die Methode über die lokale Dichte als auch diejenige über Differenzvektoren sind geeignet, Raster in Datensätzen zu erkennen, die entweder nur aus Punkten bestehen, die dem Raster zuzuordnen sind oder aber in unregelmäßigen verteilten Punkten eingebettet sind (Abbildung 38). Bei Verwendung der lokalen Dichte auf Basis der Voronoiregionen ist es jedoch zum Teil nicht möglich, die Randpunkte mitzuerfassen, da diese in Voronoiregionen mit unendlicher Ausdehnung liegen, wodurch auch die Dichte unendlich groß wird.



**Abbildung 38** Ergebnisse der Rastererkennung bei einem von zufälligen Punkten eingeschlossenen Raster

Wenn das Raster wie in Abbildung 39 mit unregelmäßig angeordneten Punkten überlagert wird, versagen diese Methoden. In diesem Fall muss sich von der Dreiecksstruktur gelöst werden, nachdem in einem Teilbereich eine Basis zur Beschreibung eines Rasters gefunden wurde. Danach können die restlichen Messwerte auf eine mögliche Einbettung in das Raster geprüft werden.



**Abbildung 39** Rasterartige Struktur mit eingestreuten Punkten (Ausschnitt aus einer Messung des LKN-SH 1995)

## 5 Datenmanagement und Implementierung

Für die Betrachtung hydro- und morphodynamischer Fragestellungen im Küstenbereich werden von den verschiedenen Institutionen (z. B. NLWKN, LKN-SH) im Rahmen ihrer hoheitlichen Aufgaben Topografie- und Bathymetriedaten erhoben, verarbeitet und archiviert. Im Regelfall ist die topografische beziehungsweise bathymetrische Veränderung eines Gebiets Gegenstand des Interesses, so dass diese Daten mit einer gewissen Regelmäßigkeit erhoben werden.

Die stetige Weiterentwicklung der Messtechnik führt zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Genauigkeit der Daten, in der Regel verbunden mit einer höheren räumlichen Dichte. Die Verfügbarkeit entsprechend großer Speichervolumina und mitgewachsener Datenbanksysteme erlaubt es auch in Zukunft, diese Vermessungsdaten zu archivieren.

Für die Untersuchung morphodynamischer Fragestellungen sollen in Zukunft topografische und bathymetrische Vermessungsdaten in ihrer zeitlichen Einordnung betrachtet werden. Die Menge der zu verarbeitenden Daten wächst somit räumlich und zeitlich. Eine weitere Zunahme des Datenumfangs ist im Zusammenhang mit der Erweiterung der digitalen bathymetrischen Modelle, beispielsweise durch sedimentologische bzw. ökologische Komponenten sowie durch Berücksichtigung anthropogener Eingriffe, zu erwarten.

### 5.1 Objektorientiertes Datenmodell

Die Verwaltung großer Mengen von Vermessungen, aus unterschiedlichen Quellen und mit verschiedenen Messverfahren aufgenommen, unter der Zielgabe bathymetrische Modelle in Raum und Zeit zu entwickeln, erfordert ein geeignetes Datenmodell. Durch die Notwendigkeit, Daten, Metadaten und zugehörige Interpolationsmethoden zusammen zu verwalten, bietet sich eine objektorientierte Umsetzung an. Mit dem Einsatz des objektorientierten Datenbankmanagementsystems db4o [12] ist es gelungen, ohne Systembrüche auszukommen.

Die Basisklassen umfassen solche für topographische Punkte, digitale Vermessungen, Metadaten und digitale Geländemodelle. Der Zugriff auf die Vermessungen erfolgt in der Regel über die zugehörigen Metadaten. Die Klasse `Kuefo90MetaData` ist von der allgemeinen Klasse `MetaData` (basierend auf dem ISO19115 Standard) abgeleitet.

Die Klasse `DigitalSurveying` verwaltet die eigentlichen Vermessungsdaten in Form einer Menge von topographischen Punkten, einem Verweis auf die zugehörigen Metadaten und einer Interpretationsvorschrift in Form einer Klasse, die das Interface `ScalarFunction2d` implementiert. Der Aussagebereich einer Vermessung wird durch eine `Region (Region2d)` in der Ebene beschrieben.

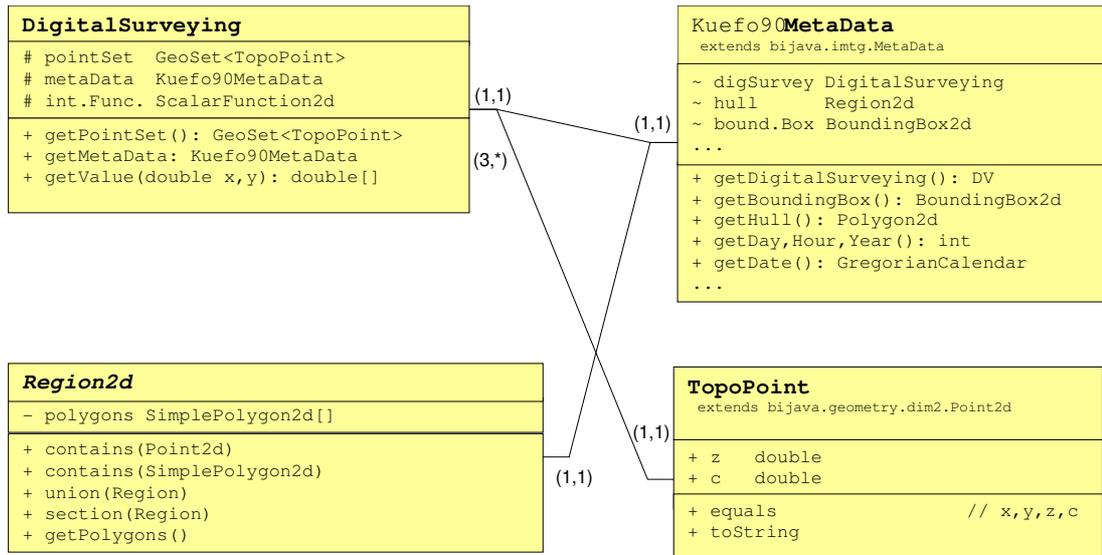


Abbildung 40 Klassendiagramm zur Verwaltung von digitalen Vermessungen

Das entwickelte Interface `TopographicModel` stellt eine implementierungsunabhängige Möglichkeit zur Verfügung, an einer beliebigen Stelle eine Tiefe und die zugehörige Vertrauenswürdigkeit zu erhalten. Die eigentliche Bestimmung des Tiefenwertes hängt von der implementierten Interpolations- bzw. Approximationsmethode ab. Für zeitvariante digitale bathymetrische Modelle steht die abstrakte Klasse `TimeAssociatedTopographicModel` zur Verfügung. Die Bestimmung der Tiefe an einem Ort und zu einem Zeitpunkt basiert auf der Interpolation im Raum des `TopographicModel` und der zeitlichen Interpolationsmethode.

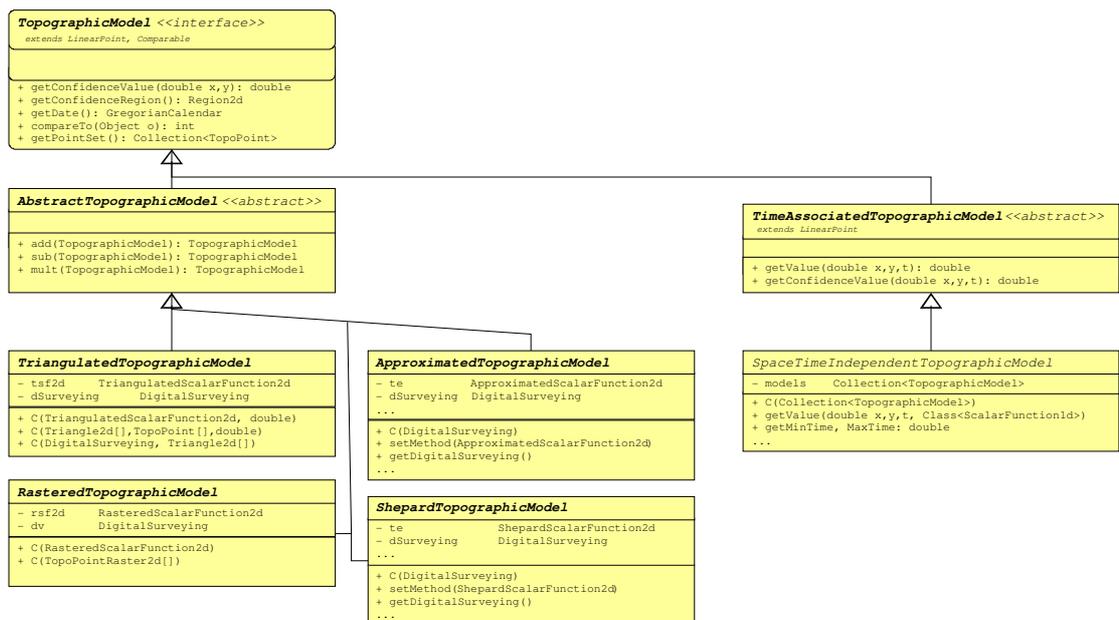


Abbildung 41 Klassendiagramm für topographische Modelle

Der effiziente Zugriff auf die zugrundeliegenden Mengen von Vermessungspunkten ist wesentliche Voraussetzung für eine praktikable Nutzung. Hierfür wurde eine mehrschichtige Indizierung der Vermessungsdaten entwickelt und implementiert.

### 5.2 Verwaltung großer Datenmengen

Die kontextbezogene Suche in diesen Datenmengen ist eine grundlegende Operation der Datenverwaltung. Die dafür benötigten Suchalgorithmen basieren auf dem Prinzip der Indizierung. Ein Index wird verwendet, um die Suche nach einem Datum in einer Datenmenge zu beschleunigen. Alltäglich auftretende Beispiele für den Gebrauch von Indizes sind die Suche eines Begriffs im Lexikon oder die Suche eines Eintrags in den Gelben Seiten. Diesen Beispielen gemein ist, dass die Daten nach Ordnungskriterien strukturiert werden und der Suchbereich in zum Datentyp passender Weise über einen Index eingegrenzt wird. So muss nicht die gesamte Menge Eintrag für Eintrag durchsucht werden. Da bereits effiziente Indizierungen für georeferenzierte Daten existieren [7], wurden diese mit den im Projekt vorhandenen Daten erprobt. Die Topologie der Daten ist für die eingesetzten Interpolationsmethoden wesentliche Grundlage. Daher wurden die Indizierungen auf ihre Eignung bei der Bestimmung der nächsten Nachbarn untersucht.

#### 5.2.1 Gitter-basierte Indizierung

Ein Gebiet wird in quadratische, gleich große Teilgebiete, so genannte Zellen, zerlegt, deren Vereinigung ein Gitter ergibt. Jeder Punkt des Gebietes lässt sich mittels einer Indexfunktion  $f(x, y) \rightarrow idx$  eindeutig und ohne aufwändige Berechnung genau einer Zelle zuordnen.

Die Zerlegung überdeckt das Gebiet, so dass je nach Anwendung des Gitters besondere Maßnahmen für die Zellen getroffen werden müssen, die den Rand des Gebietes schneiden.

Ein Gitter ist aufgrund der einfachen Indexierung gut geeignet, geometrische Objekte zu verwalten. Für die Suche der nächsten Nachbarn eines gegebenen Punktes  $P(x, y)$  wird zunächst seine Zelle anhand der Indexfunktion bestimmt. Die relative Lage des Punktes innerhalb dieser Zelle bestimmen konzentrische Kreise ( $K_{s=0}, K_{s=1}, \dots$ ), in denen nächste Nachbarn eindeutig bestimmt werden können. Der Kreisindex  $s$  bestimmt den zu durchsuchenden  $(2s+1)$ -Zellpatch und wird solange erhöht, bis die gewünschte Anzahl Nachbarn gefunden wurde.

Die Uniformität der Zellen bedingt jedoch das Fehlen von Adaptivität, die notwendig wäre, um die räumliche Verteilung der Objekte zu berücksichtigen. Ein Teilgebiet, welches viele Objekte enthält, wird von der gleichen Anzahl Zellen überdeckt, wie ein Teilgebiet mit wenigen Objekten. Dieser Nachteil legt die Betrachtung hierarchischer Datenstrukturen nahe.

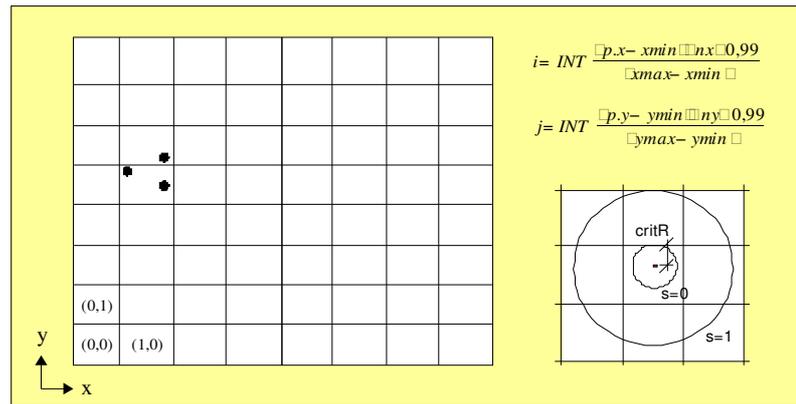


Abbildung 42 Gitterstruktur und eine Indexfunktion

### 5.2.2 Quadtree-basierte Indizierung

Baumartige Datenstrukturen bestehen aus Knoten, die durch eine Super-Sub-Relation miteinander in Beziehung stehen. Jeder Subknoten hat genau einen Superknoten. Ein Superknoten kann mehrere Subknoten haben und kann selbst Subknoten sein. Ein Baum hat genau einen Superknoten als Wurzel. Ein Subknoten, der kein Superknoten ist, heißt Blattknoten des Baumes.

Ein Quadtree hat eine baumartige Struktur, bei der ein Knoten ein quadratisches Gebiet repräsentiert. Ein Superknoten hat genau vier Subknoten, die sein Gebiet in disjunkte Quadranten zerlegen. Jeder Knoten hat eine a priori festgelegte Kapazität für die Aufnahme von Daten in seinem Gebiet (in Abbildung 43 ist die Kapazität genau eins). Wird diese Kapazität überschritten, teilt der Knoten seine Daten auf vier neue Subknoten auf.

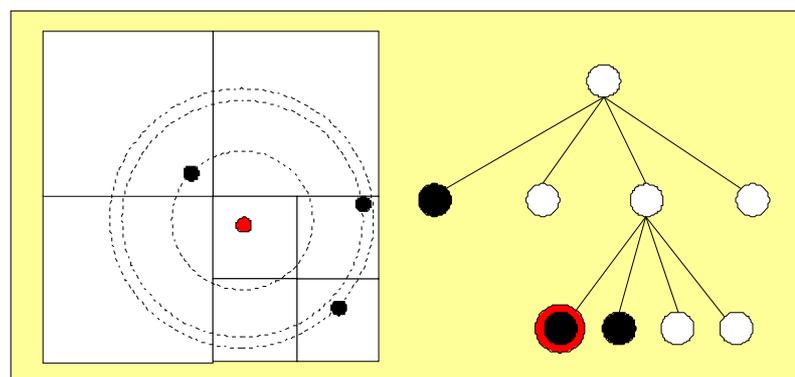


Abbildung 43 Baumartige Struktur des Quadtrees

Die Suche eines Datums innerhalb des Gebietes beginnt bei der Wurzel des Baumes und verläuft von dort entlang der Knoten, die das Datum geometrisch enthalten. Der sich ergebende Blattknoten enthält das Datum. Im Gegensatz zum Gitter ist die Suche zwar sehr speichereffizient und elegant programmierbar, jedoch nicht genügend performant.

Die Suche der nächsten Nachbarn gestaltet sich noch aufwändiger. Die Suche der Nachbarn des in Abbildung 43 rot markierten Punktes involviert nicht nur Zellen des Zweiges, in den der rote Punkt fällt, sondern auch in der Struktur weit entfernter

Zellen. Der Quadtree ist nicht lokal ordnungserhaltend, da nah beieinander liegende Daten nicht zwangsläufig auch in der Struktur nah beieinander liegen.

Im Rahmen der Untersuchung der Datenstruktur wurde ein effizienter Algorithmus zur Nachbarschaftssuche implementiert, der die Anzahl der zu überprüfenden Knoten minimiert. Die folgenden Tabellen zeigen die Performance des Gitters und des Quadtrees auf der Grundlage eines 189.685 Punkte umfassenden Datensatzes des LKN-SH (w\_1999-08-15\_0182) für verschiedene Zellkapazitäten. Die Suchdauer ist die Zeit, die für die Suche der zehn nächsten Nachbarn eines zufällig gesetzten Punktes benötigt wird. Die Werte wurden auf einem MacBook Pro (Jahrgang 2006) unter Java 5.0 gemessen.

Kapazität	Aufbau: Dauer [s]	Aufbau: Speicher [MB]	Suche: Dauer [ms]
500	100,8	4,883	34,1
375	96,8	4,163	30,3
<b>250</b>	<b>94,0</b>	<b>2,982</b>	<b>29,0</b>
150	93,5	4,174	31,5
100	93,3	3,101	32,9
50	92,5	3,627	31,6

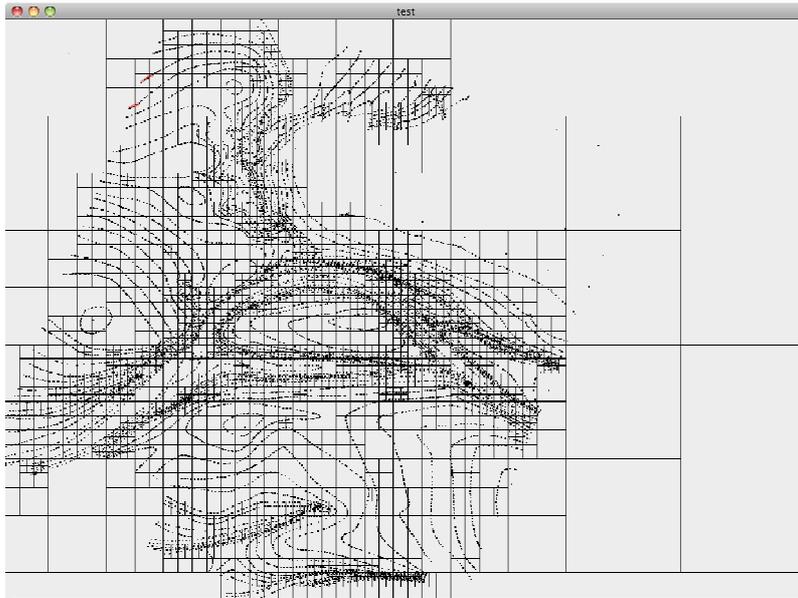
**Tabelle 1** Performance der Nachbarschaftssuche im QuadTree

Kapazität	Aufbau: Dauer [s]	Aufbau: Speicher [MB]	Suche: Dauer [ms]
500	2,2	5,968	8,7
375	2,3	6,495	6,5
<b>250</b>	<b>2,4</b>	<b>9,737</b>	<b>3,3</b>
150	2,4	6,731	3,5
100	2,6	5,516	4,9
50	2,6	12,536	5,2

**Tabelle 2** Performance der Nachbarschaftssuche im Gitter

Je niedriger die Zellkapazität beim QuadTree gewählt wird, umso größer wird die Baumtiefe. Anschließend wird im Blattknoten des Quadtrees, analog zur Zelle eines Gitters, eine lineare Suche durchgeführt, so dass die Suchdauer mit abnehmender Zellkapazität sinkt und der Speicherverbrauch zunimmt.

Im Vergleich der Performancewerte ist zu erkennen, dass die Nachbarschaftssuche im Gitter deutlich schneller ist als im Quadtree, hier bis zum Zehnfachen. Dieses zu erwartende Fazit hat sich auch in weiteren Beispielen bestätigt. Für die einfache Suche eines Elements im oben genannten Datensatz benötigt das Gitter im Mittel 0,002 Millisekunden, der Quadtree mit 0,2 ms deutlich länger.



**Abbildung 44** Quadtree mit Punkten einer digitalisierten Karte

### 5.2.3 Indizierung über Metadaten

Die Performance der Nachbarschaftssuche ist jedoch kein hinreichendes Entscheidungskriterium für eine Gitterstrukturierung sämtlicher Daten. Vielmehr müssen sich die Daten auch nach inhaltlichen Kriterien, wie zum Beispiel der Zugehörigkeit zu einer bestimmten Vermessungsart oder zu Regionen mit spezifischen Interpolationsvorschriften, gruppieren lassen. Dafür ist eine nicht-hierarchische Datenstruktur wie das Gitter ungeeignet.

Die bei der Erhebung der Messdaten zugeordneten Metadaten stellen eine wesentliche Informationsquelle für semi- und vollautomatische Analyseverfahren dar, insbesondere um anhand der dort abgelegten Dateneigenschaften über die anzuwendenden Methoden zu entscheiden. Die Informationen über die räumliche Ausdehnung der Daten, zunächst das minimal umgebende Rechteck und später auch nicht-konvexe Regionen, wurden als Erstes für eine Ordnung der Daten in Datenboxen genutzt. Diese Informationen stellen somit ein Ordnungskriterium ersten Ranges dar. Nachrangig werden problembezogen weitere Ordnungskriterien angewendet. Schließlich kann ein Gitter eingesetzt werden, wenn die Anzahl der Daten in den einzelnen Datenboxen dies erfordert. Diese Indizierung ist generisch entworfen worden, so dass sich ein Gitter oder ein Quadtree als Spezialfälle daraus ergeben. Die Datenstruktur wird in Abschnitt 5.4 detailliert beschrieben.

## 5.3 Objektorientierte Datenbank Db4o

Digitale Bathymetriesimulationen basieren auf Vermessungsdaten, Metadaten und Methoden, die als Einheit betrachtet werden müssen und daher in einem objektorientierten Datenbanksystem persistiert werden. Objektdatenbanken bieten für das Projekt den Vorteil, modell-konsistent arbeiten zu können und somit keine

Abbildung verschiedener Datenmodelle, vom objektorientierten zum relationalen und zurück, durchführen zu müssen.

Grundsätzlich stehen Objektdatenbanken vor der Herausforderung, unbeschränkte Objektmodelle mit ihrer durch Vererbungshierarchien und Beziehungsnetzen inhärenten, hohen Komplexität auf ein lineares Speichermedium abbilden zu müssen.

Db4objects ist eine Objektdatenbank mit einer hohen Entwicklungsdynamik und hat als Alleinstellungsmerkmal native Anfragen. Eine zweite Sprache neben der Sprache, in der implementiert wird, wie die bei relationalen Systemen übliche und ANSI standardisierte Structured Query Language (SQL), wird nicht mehr benötigt. Ein weiterer Vorteil von db4objects gegenüber seinen Mitstreitern, wie Objectivity oder Progress ObjectStore, ist seine minimale Invasivität bei der Codierung.

### 5.4 Verwaltung allgemein georeferenzierter Objekte

Vermessungspunkte und zugehörige Strukturinformationen (wie Elemente, Kanten usw.) bilden die Grundlage digitaler Geländemodelle. Sie haben die Eigenschaft, über raumbezogene Informationen eine Einordnung in ein zugehöriges Koordinatensystem zu erlauben. Um die georeferenzierten Objekte auch nach inhaltlichen Kriterien gruppieren zu können, eignet sich eine Indizierung über Metadaten besser als eine klassische Quadtree- oder Gitter-Struktur.

Für die Erstellung digitaler Geländemodelle sowie darauf aufbauender Untersuchungen morphologischer Tendenzen, sind Vermessungen mit mehreren Millionen Messpunkten auszuwerten. Hierzu sind eine effiziente Verwaltung und insbesondere eine schnelle Nachbarschaftssuche essentiell. Um eine Einordnung der Objekte auch nach inhaltlichen Kriterien zu ermöglichen, wurde das im Folgenden vorgestellte Klassenmodell entwickelt.

#### 5.4.1 Klassenmodell zur Datenverwaltung

Die Verwaltung einer großen Menge von georeferenzierten Objekten erfolgt mit einer generischen abstrakten Klasse `GeoSet`. Die abstrakte Klasse `GeoSet` ist aufgebaut aus einer georeferenzierten Metadatenstruktur zur Beschreibung der Datenboxen und den dazugehörigen Mengen von georeferenzierten Objekten (Punkte, Kanten, ...). Diese Aufteilung der Datenmenge in Metadaten und Daten ermöglicht eine transparente und effiziente Verwaltung großer Datenmengen und insbesondere eine schnelle Nachbarschaftssuche.

##### Metadaten

In Anlehnung an die Metadaten für einzelne Vermessungen werden interne georeferenzierte Metadaten zur Beschreibung der Datenboxen verwendet. Diese enthalten zum einen die raumbezogenen Informationen für die Einordnung der georeferenzierten Objekte und zum anderen Methoden zur Einordnung. Die allgemeinen Anforderungen an die georeferenzierten Metadaten sind in der abstrakten Klasse `LocalMeta` definiert.

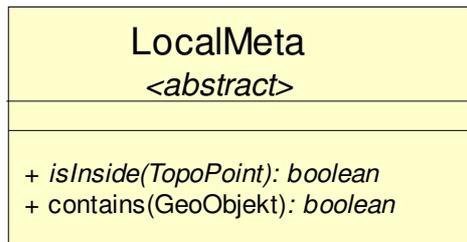


Abbildung 45 Abstrakte Klasse

Ausgehend von der abstrakten Klasse `LocalMeta` erfolgt eine Differenzierung in einfache und komplexe Metadaten. Einfache Metadaten beschreiben einzelne georeferenzierte Datenboxen, wohingegen komplexe Metadaten eine Menge von Datenboxbeschreibungen enthalten, die einfach oder wiederum komplex sein können. Dies erlaubt den Aufbau hierarchischer Strukturen. Die allgemeine Beschreibung für einfache Metadaten erfolgt in einer abstrakten Klasse `MDSimple` und für komplexe Metadaten in einer abstrakten Klasse `MDComplex`.

Die abstrakten Klassen `LocalMeta`, `MDSimple` und `MDComplex` sind allgemeine Beschreibungen von einfachen und komplexen georeferenzierten Metadaten. Da sich die raumbezogenen Informationen (Metadaten) für die Einordnung und die Methoden zur Einordnung von Element zu Element unterscheiden (Kreis, Rechteck, Dreieck), sind konkrete einfache und komplexe georeferenzierte Metadaten abgeleitet und implementiert worden.

### Datenboxen

Die Datenboxen verwalten die eigentlichen georeferenzierten Objekte und werden über ihre Metadaten beschrieben. Ausgehend von einer allgemeinen Definition einer Datenbox durch die abstrakte Klasse `LocalElement` erfolgt eine Differenzierung in einfache und komplexe Datenboxen. Einfache Datenboxen werden durch konkrete einfache Metadaten beschrieben, wohingegen komplexe Datenboxen durch konkrete komplexe Metadaten beschrieben werden. Die Einordnung der georeferenzierten Objekte sowie die für die Nachbarschaftssuche relevanten Objekte werden nur über die entsprechenden Metadaten ermittelt.

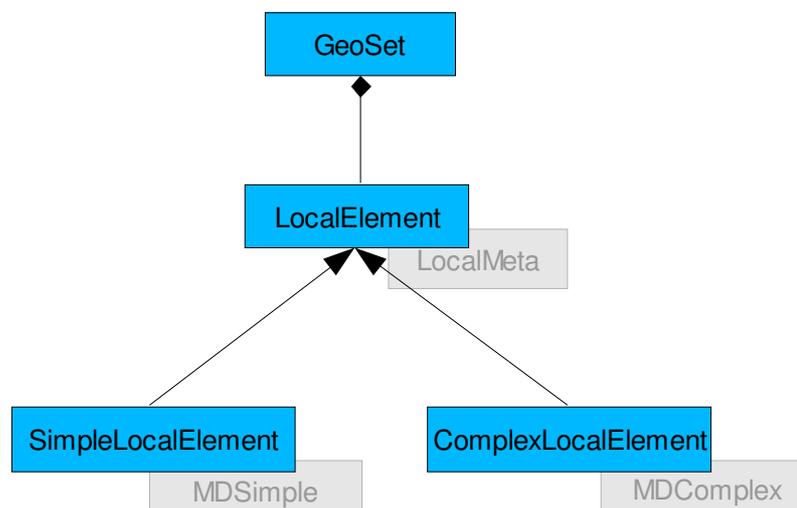


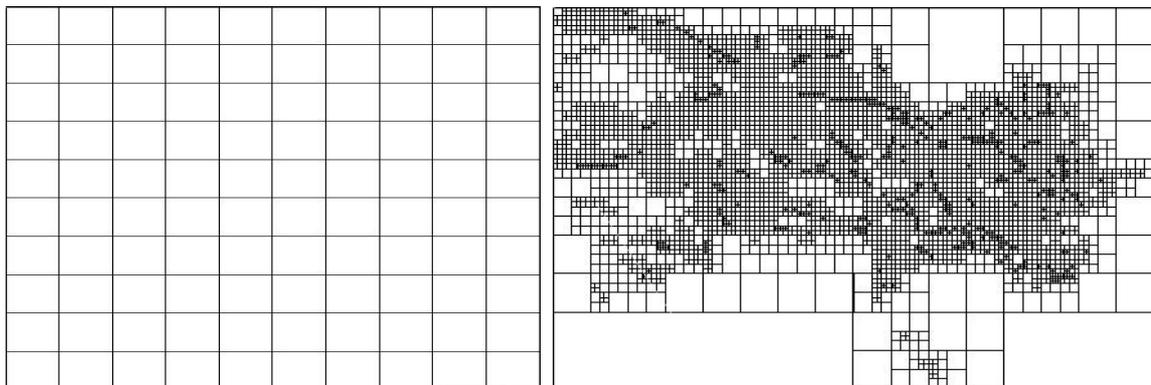
Abbildung 46 UML-Klassendiagramm der Datenboxen

**Performance-Vergleich**

Für Performancemessungen wurden Punktdaten von digitalisierten Isolinien aus Blattsnitten des LKN-SH des Jahres 1976 verwendet (Abbildung 47). Die Punktmenge umfasst 625943 Punkte.



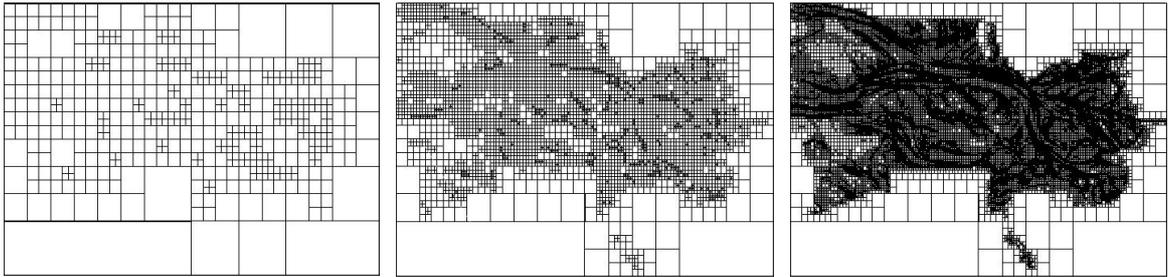
**Abbildung 47** Punktmenge des Referenzgebietes



**Abbildung 48** reguläre Zerlegung Raster 10x10 (links) und hierarchische Zerlegung (rechts)

Es wurden regelmäßige und hierarchische Zerlegungen untersucht (Abbildung 48). Als Szenarien für reguläre Strukturierungen wurden die Raster 10x10 und 100x100 sowie die komplette Punktmenge herangezogen.

Für hierarchische Zerlegungen wurden strukturierte hierarchische Gitter so generiert, dass diese maximal 5, 25, 250 und 2500 Elemente pro Datenbox aufnehmen konnten (Abbildung 49).



**Abbildung 49** Beispiele für unterschiedliche Elementanzahl pro Datenbox. 2500 (links), 250 (mitte) und 25 (rechts) Elemente pro Box

Die Ergebnisse für eine Suche der nächsten 10 Punkte zu einem Referenzpunkt sind in nachfolgender Tabelle 3 dargestellt.

	klassisch	10x10	100x100	2500	250	25	5
[ms]	12172	298	642	125	49	47	88

**Tabelle 3** Ergebnisse der Suche der nächsten 10 Punkte zu einem Referenzpunkt

Für die Nachbarschaftssuche ohne Strukturierung der Punktemenge wird eine Zeit von 12172 ms benötigt.

Mit der Verwendung von regulären Gittern ist eine Reduzierung der Zeit für die Nachbarschaftssuche um den Faktor 40 festzustellen, wobei der Zeitaufwand zur Ermittlung der entsprechenden Datenboxen mit ansteigender Rastergröße stärker ansteigt als die Suche der nächsten Punkte innerhalb der Datenboxen.

Die Nachbarschaftssuche unter Anwendung hierarchischer Zerlegungen kann noch weiter minimiert werden, wobei auch hier bei einer zu tiefen Metadatenstruktur die Ermittlung der entsprechenden Datenboxen mehr Zeit kostet als die Suche der nächsten Punkte innerhalb der Datenboxen.

## 6 Interpolationsmethoden

Vermessungsdaten und zugehörige Metadaten bilden die Grundlage für die Beschreibung von Geländeoberflächen. Basierend auf diesen Informationen werden kontinuierliche Oberflächenbeschreibungen durch Approximations- und Interpolationsverfahren abgeleitet. Bei einer Approximation nähert sich die Funktion den Werten an den vorhandenen Stützstellen an. Die Interpolation ist ein Spezialfall der Approximation, bei der die Werte der Stützstellen genau wiedergegeben werden. Die Festlegung des Aussagebereiches einer Approximation bzw. Interpolation erfolgt in der Regel durch die Metadaten der Vermessung. Liegt kein Aussagebereich vor, so wird häufig die Hülle der Messpunkte als Aussagebereich herangezogen. Von Extrapolation wird gesprochen, wenn auch Aussagen außerhalb des Aussagebereiches getroffen werden können. Interpolations- und Approximationsverfahren können in netzfreie und netzbasierte Methoden klassifiziert werden.

Innerhalb einer Vermessung ergeben sich die Interpolationen in der Regel aus der Struktur der Vermessungsdaten bzw. dem Aufnahmeverfahren. So wird zwischen den Vermessungspunkten bilinear interpoliert, wenn diese in einem regulären Raster vorliegen, und linear, wenn ein Dreiecksnetz vorliegt. Für die speziellen Strukturen, die bei Profilvermessungen und der Digitalisierung von Isolinien aus historischen Karten entstehen, wurden angepasste Isolinien- und Profil-Interpolationen entwickelt. Beide Interpolationen basieren auf der Interpolation zwischen zwei Kanten. Stehen keine expliziten Strukturinformationen aus den Vermessungsdaten zur Verfügung, so kann beispielsweise die netzfreie Shepard-Interpolation angewendet werden, welche durch Hinzuziehen physikalischer Kenngrößen verbessert werden kann.

### 6.1 Lineare Interpolation zwischen zwei Kanten

Bei der Datenaufnahme ergeben sich in der Anordnung der Vermessungspunkte zum Teil Strukturen, die bei der Interpolation berücksichtigt werden können. Beispiele hierfür sind beispielsweise Profilvermessungen mit mehreren nebeneinander angeordneten Profilen oder digitalisierte Karten mit vorgegebenen Isolinien. Profile und Isolinien können als geordnete Menge von Kanten aufgefasst werden, zwischen denen interpoliert wird.

Bei der Kanten-Interpolation zwischen den Kanten  $z_1\_z_2$  und  $z_3\_z_4$  (Abbildung 50) wird mit der linearen Interpolation zwischen zwei Punkten einer Kante begonnen:

$$z = z_1 \cdot (1 - d_1 / (d_1 + d_2)) + z_2 \cdot (1 - d_2 / (d_1 + d_2)) \quad \text{Gl. 6-1}$$

mit  $d_i$  = Abstand zum Interpolationsort  
 $z_i$  = Tiefenwert der Stützstelle

Es wird für beide Kanten der Tiefenwert an der Stelle der Kante bestimmt, auf die die senkrechte Projektion des Interpolationspunktes fällt. Die Tiefe am zu interpolierenden Punkt wird dann als Linearkombination dieser Werte, wiederum gewichtet über die Entfernung zu den Kanten, bestimmt.

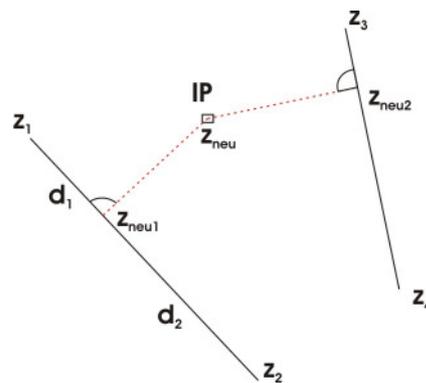


Abbildung 50 Lineare Interpolation zwischen zwei Kanten

## 6.2 Isolinien-Interpolation

Bei der Digitalisierung historischer Karten werden in der Regel die Isolinien abgefahren, so dass eine Menge von Linien gleicher Höhe entsteht, deren Dichte wesentlich von den topographischen Gegebenheiten bestimmt ist.

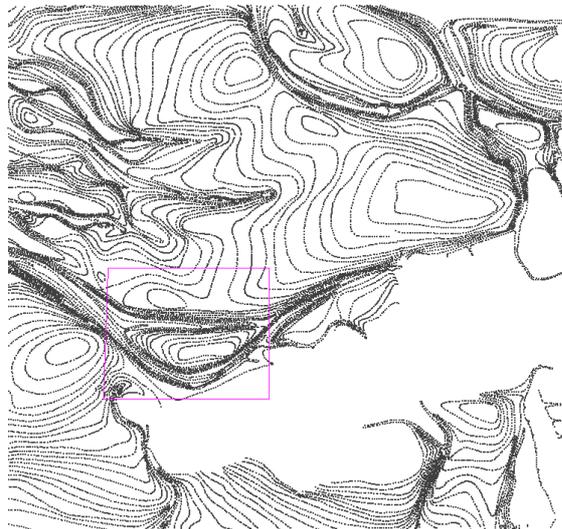


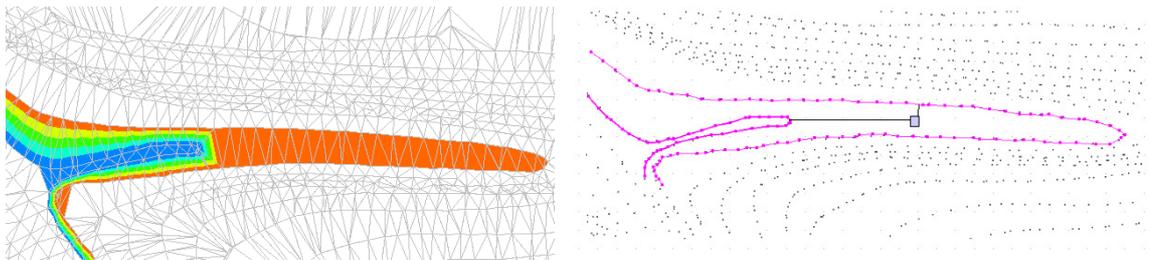
Abbildung 51 Vermessungspunkte einer digitalisierten Karte. Der rote Bereich markiert den Darstellungsbereich aus Abbildung 53.

Werden so strukturierte Punktmengen nur nach Delaunay trianguliert und die Oberfläche linear auf den Dreiecken interpoliert, kommt es in der Regel zu unrealistischen Geländebeschreibungen.

Die entwickelte und implementierte Isolinien-Interpolation berücksichtigt die besondere Struktur der Daten und führt in der Regel zu guten Ergebnissen. Bei der Isolinien-Interpolation eines Punktes  $IP$  wird davon ausgegangen, dass sich die Tiefe aus den beiden benachbarten Isolinien ergibt. Hierzu wird sowohl nach der Isolinien-Kante mit dem nächsten Punkt als auch nach der Kante gesucht, auf die eine senkrechte Projektion mit dem geringsten Abstand zum  $IP$  möglich ist. Mehrere Testläufe haben gezeigt, dass die gefundenen Kanten in der Regel identisch sind und durch eine senkrechte Projektion der Abstand zum  $IP$  verringert wurde. In einigen Fällen liegen die beiden gefundenen Kanten jedoch nicht auf einer Isolinie. Dann ist der Abstand zur Kante mit dem nächsten Punkt in der Regel deutlich kleiner. Dies

zeigt, dass durch die beliebige Anordnung der einzelnen Kanten eine senkrechte Projektion auf diese nicht immer möglich sein muss. In einem solchen Fall wird die Kante mit dem geringsten Abstand zum Interpolationsort herangezogen. Für beide Fälle treten in wenigen Fällen Ausnahmen auf, die gesondert behandelt werden.

Ist die erste Isolinie gefunden, wird auf analoge Weise die zweite Isolinie, zwischen denen der  $IP$  liegt, gesucht. Als Bedingung ergibt sich zusätzlich, dass vom  $IP$  zur zweiten Isolinie die zuerst gefundene nicht geschnitten werden darf. Die eigentliche Interpolation erfolgt dann zwischen den zwei gefundenen Kanten.

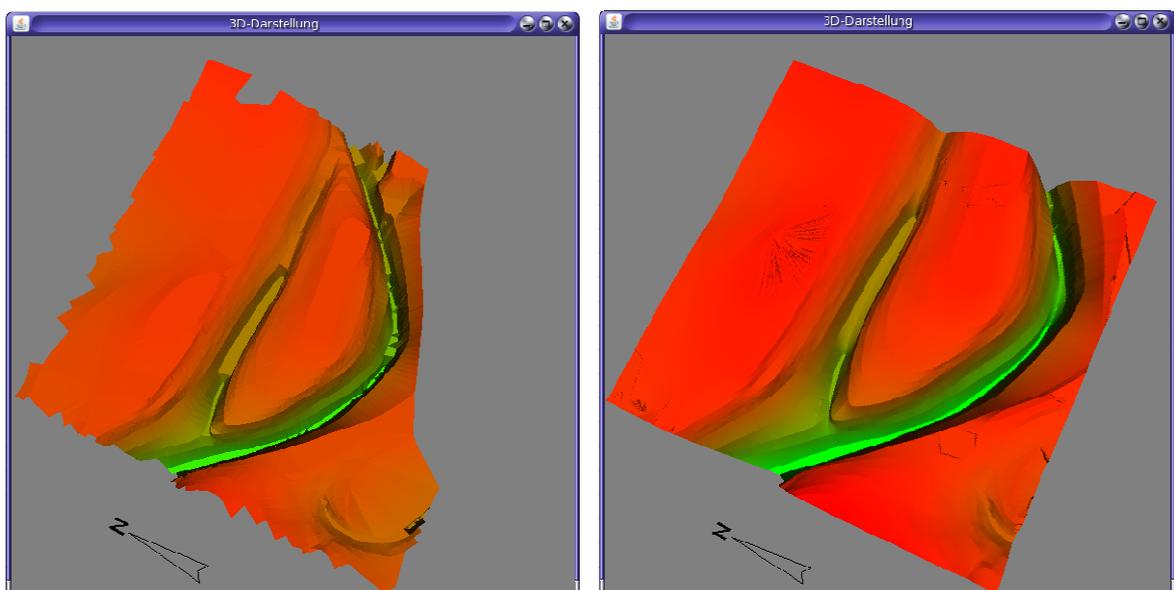


**Abbildung 52** Strukturen und Interpolationsschema einer Delaunay-Triangulation und einer Isolinien-Interpolation.

Zum Vergleich wurden Tiefenwerte für die Vermessungspunkte einer digitalisierten Karte, hier der rot markierte Bereich in Abbildung 51, zum einen durch eine Delaunay-Triangulation und zum anderen durch eine Isolinien-Interpolation ermittelt. Das Ergebnis ist in Abbildung 53 dargestellt.

In der oberen Rinne wird der Einfluss der Lage der Dreiecke auf das Interpolationsergebnis deutlich. Dadurch, dass die Vermaschung immer mit der gegenüberliegenden Isolinie erfolgt, werden die größeren Tiefenwerte nicht in die Interpolation einbezogen. Es entsteht ein deutlicher Sprung mit anschließender Ebene in der Rinne.

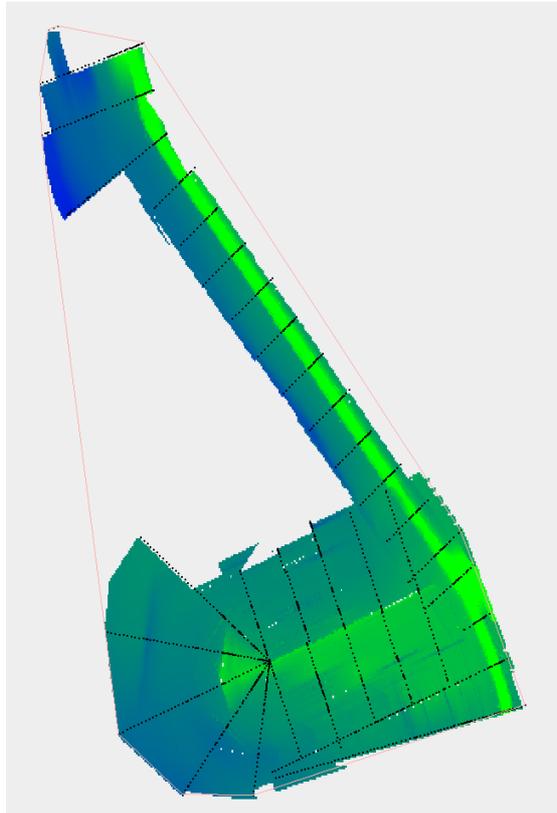
Die Isolinien-Interpolation gibt die Tiefenverhältnisse in der Rinne wesentlich besser wieder.



**Abbildung 53** Interpolation mittels Triangulation (links) und Isolinien-Interpolation (rechts)

### 6.3 Profilinterpolation

Die Entwicklung der Küsten und Küstenabschnitte wurde in der Vergangenheit häufig und auch noch heute durch das Vermessen von regelmäßig angeordneten Profilen protokolliert. In Abbildung 54 ist ein Beispiel für die Anordnung von Profilen und dem Ergebnis einer Profil-Interpolation dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass Profil-Vermessungen nicht immer parallel verlaufen müssen und sich unter Umständen auch schneiden können.



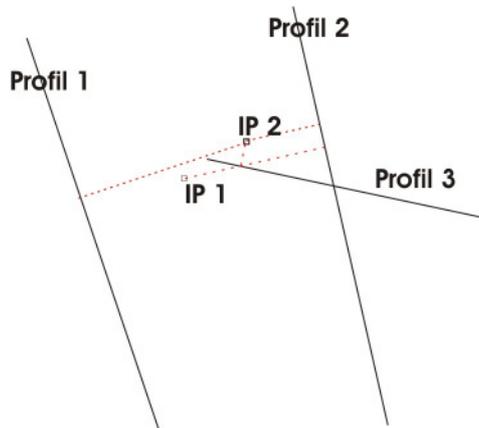
**Abbildung 54** Beispiel einer Profil-Interpolation

Für die Profil-Interpolation müssen in einem ersten Schritt für einen zu betrachtenden Interpolationspunkt  $IP$  die Profile ermittelt werden, welche in die Interpolation einbezogen werden sollen. Hierzu wird ein idealisierter Profilverlauf mit einer Kante durch den ersten und letzten Punkt des Profils genutzt. In der Regel liegt der  $IP$  eindeutig zwischen zwei Profilen, so dass auf der Strecke  $IP$  zu den zugehörigen Profilen kein anderes Profil geschnitten wird.

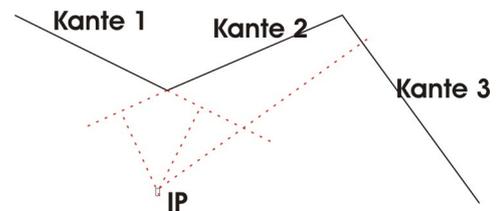
Durch querliegende Profile ist diese Bedingung jedoch nicht immer erfüllt. In solchen Fällen wird ein Schnittpunkt mit einem anderen Profil zugelassen, wenn dieses in einem vorgegebenen Winkel zu den für die Interpolation in Frage kommenden Profilen liegt (Abbildung 56a,  $IP1$ ). Ebenfalls kann es bei sich schneidenden Profilen sinnvoll sein, nicht das nächste in ähnlicher Richtung ausgerichtete Profil in die Interpolation einzubeziehen, sondern das querliegende nähere, oder gegebenenfalls beide mit entsprechender Wichtung (Abbildung 56a,  $IP2$ ).

Eine Profil-Interpolation kann für einen Punkt  $IP$  nur erfolgen, wenn sich zwei Profile finden lassen, auf die eine senkrechte Projektion vom Interpolationsort aus möglich ist. Außerdem darf der Interpolationsort nicht außerhalb der nichtkonvexen Hülle der

Vermessungspunkte liegen. Zusätzlich wurde ein mittlerer Profilabstand ermittelt, der bei der Ermittlung des Abstandes *IP* zum Profil nicht überschritten werden darf.



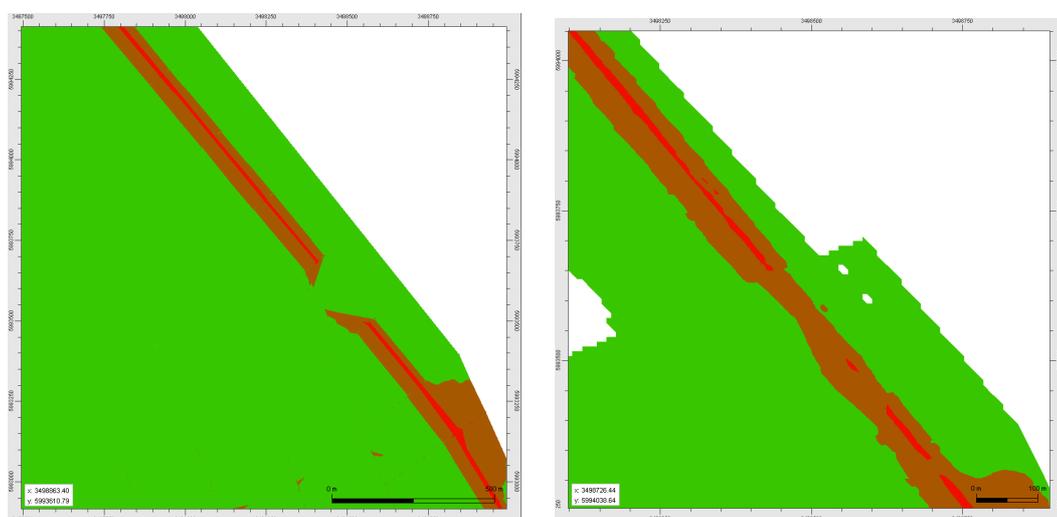
**Abbildung 56a** Sonderfälle bei der Ermittlung des richtigen Profils



**Abbildung 55b** Sonderfall bei Ermittlung der richtigen Kante zur Profil-Interpolation

Wurden die betreffenden Profile gefunden, muss nun die jeweilige zur Interpolation heranzuziehende Kante des Profils bestimmt werden. Auf den ersten Blick sollte auch hier eine senkrechte Projektion des *IP* auf die Kante möglich sein. Da die einzelnen Kanten zum Teil recht ungeordnet und nicht auf einer Linie liegen, ist dies jedoch nicht immer gegeben (Abbildung 55b). Es können aber auch mehrere mögliche Kanten gefunden werden. In diesem Fall wird die Kante gewählt, die dem *IP* am nächsten liegt. Wird keine mögliche Kante gefunden, wird der Endpunkt einer Kante herangezogen, welcher dem *IP* am nächsten liegt.

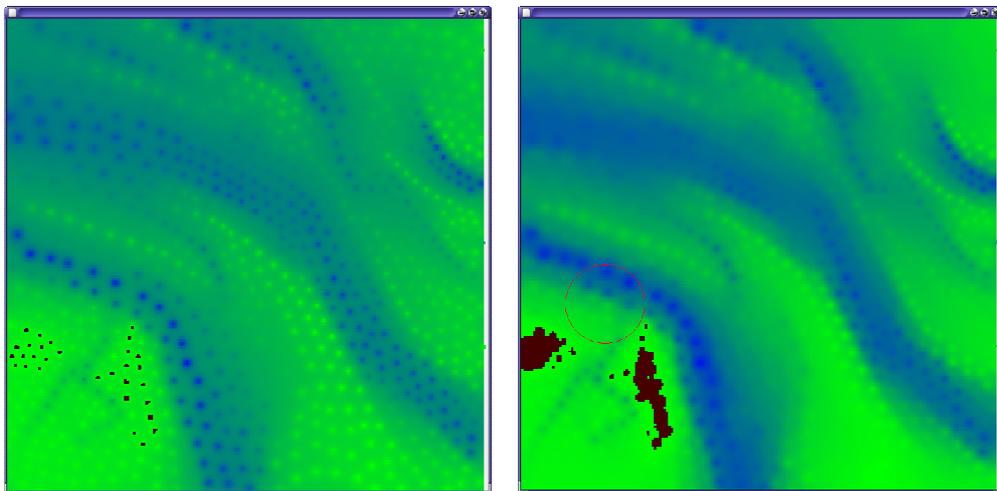
In Abbildung 57 ist für einen Teilbereich des Beispiels zum Vergleich das Ergebnis einer linearen Interpolation auf einem Dreiecksnetz und der Profil-Interpolation dargestellt. Im Gegensatz zur Profil-Interpolation entsteht bei der Dreiecksinterpolation durch eine ungünstige Lage der Dreiecke ein deutlicher Sprung im Tiefenverlauf.



**Abbildung 57** Vergleich zwischen einer linearen Interpolation auf einem Dreiecksnetz (links) und einer Profil-Interpolation (rechts).

## 6.4 Räumliche Interpolation unter Verwendung von Restströmen

Stehen keine zusätzlichen Strukturinformationen in den Vermessungsdaten zur Verfügung, dann können netzfreie Interpolationen wie die Shepard-Interpolation verwendet werden. Bei den netzfreien Interpolationsverfahren werden die expliziten Strukturinformationen in Form von Netzen oder Zerlegungen durch implizite Algorithmen ersetzt. Die klassische Shepard-Interpolation geht davon aus, dass der Einfluss der Stützstellen mit dem umgekehrten Abstand zum betrachteten Punkt abnimmt. Ein großer Nachteil der Shepard-Interpolation besteht darin, dass sich um die Stützstellen Plateaus ausbilden. Je mehr Stützstellen in die Interpolation einbezogen werden, desto stärker sind diese ausgeprägt. Die Auswahl der Stützstellen erfolgt in der Regel durch die Vorgabe von Suchradien. Die Größe des Suchradius ist unter anderem abhängig von der Punktdichte und der Struktur des Geländes und erfordert viel Erfahrung.



**Abbildung 58** Shepard-Interpolation unter Einbeziehung aller Stützstellen (links). In der rechten Abbildung wurden nur Stützstellen innerhalb eines Radius (roter Kreis) einbezogen.

Eine Verbesserung der Shepard-Interpolation für tidedominate Küstengebiete kann erreicht werden, wenn Reststromfelder herangezogen werden, die in der Regel der Topografie folgen. Solche Reststromfelder können aus Naturmessungen oder aus numerischen Simulationsergebnissen abgeleitet werden. In die Interpolation sollen so vermehrt die Stützstellen eingehen, die aufgrund der hydrodynamischen Gegebenheiten einen gegenseitigen Einfluss haben.

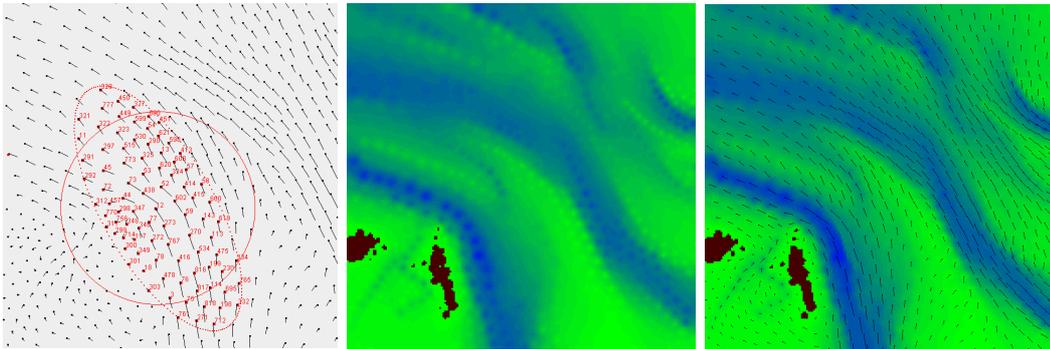
Hierzu wird innerhalb eines vorgegebenen Radius der mittlere Geschwindigkeitsvektor  $v_{\text{mittel}}$  ermittelt. Abhängig von dessen Größe und Richtung wird das zuvor kreisförmige Einzugsgebiet der Stützstellen zu einer Ellipse gestaucht. Es wird davon ausgegangen, dass die Strömung im Bereich von Rinnen stärker ist, so dass dort die Ellipsen stärker in Richtung der Struktur gestreckt werden.

Die Ellipsengleichung ergibt sich wie folgt:

$$\begin{aligned}
 x &= a \cdot \cos\phi \\
 y &= b \cdot \sin\phi \\
 \text{mit } a &= R \cdot (1,1 + v/v_{\max}) \\
 b &= R \cdot (1,1 - v/v_{\max})
 \end{aligned}
 \tag{Gl. 6-2}$$

Zur Ermittlung der Ellipsenparameter  $a$  und  $b$  wird die Vektorlänge  $v_{\text{mittel}}$  zur maximal im Kreis vorkommenden Vektorlänge  $v_{\text{max}}$  in Beziehung gesetzt. Die Ellipsenhauptachse liegt dabei in Richtung von  $v_{\text{mittel}}$ . Die Stützstellen innerhalb der Ellipse werden anschließend zur Interpolation herangezogen.

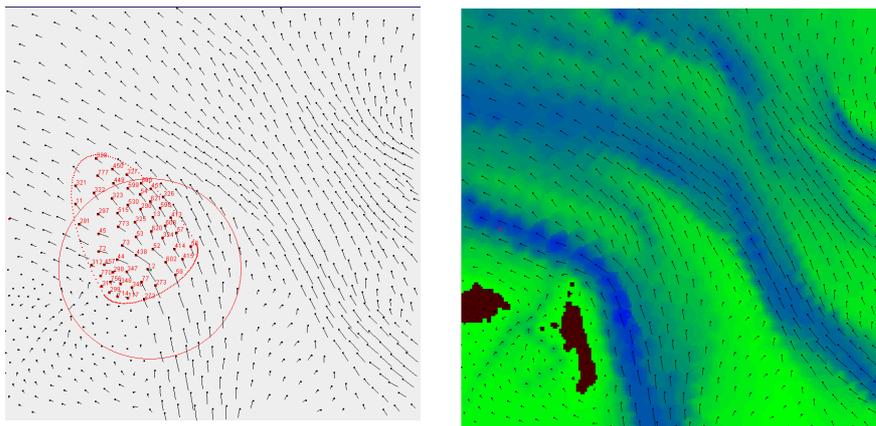
Wie in Abbildung 59 zu sehen ist, wird das Interpolationsergebnis deutlich verbessert, vor allem in Bereichen größerer Strömung.



**Abbildung 59** Verbesserung der Shepard-Interpolation durch Variation des Einzugsgebietes der Stützstellen zu einer Ellipse. In der mittleren Abbildung ist das Interpolationsergebnis aus der normalen Shepard-Interpolation und in der rechten mit den Stützstellen aus der Ellipse dargestellt.

Des Weiteren wurde die Auswirkung auf das Interpolationsergebnis untersucht, wenn in Ellipsenrichtung der Abstand der Stützstellen „künstlich“ verringert wird und sich somit ihr Gewicht bezüglich der Interpolation erhöht. Diese Methode erwies sich allerdings als ungeeignet, da es schwierig ist, ein richtiges Maß für den verringerten Abstand zu finden.

Eine weitere untersuchte Variante berücksichtigte für die Interpolation nur Messpunkte aus der Richtung der Strömung. Die Ellipse wird dadurch zu einem Ei verformt. Die eine Ellipsenhälfte entgegen der Strömungsrichtung ergibt sich wie oben beschrieben. In Richtung der Strömung wird sie gestaucht, so dass sich eine neue Ellipse ergibt, dessen Hauptachse die Querachse der ursprünglichen Ellipse ist. Obwohl auch hier die Plateaubildung deutlich verringert wird, zeigen sich merkwürdige Ausbuchtungen, vor allem an den Rändern der unteren Fahrrinne. Dies liegt daran, dass an den Rändern der Rinne im Wechsel einmal Stützstellen außerhalb und einmal innerhalb der Rinne mehr Gewicht bekommen. Die Interpolation wurde somit nicht verbessert.



**Abbildung 60** Interpolationsergebnis bei vorwiegender Berücksichtigung von Stützstellen aus Strömungsrichtung. Das Einzugsgebiet der Stützstellen ergibt sich zu einem Ei.

In der Regel liegt für die Vermessungsdaten kein Strömungsfeld vor, so dass die Auswahl der Stützstellen bezüglich der Struktur (Rinnen und Täler) erfolgen muss.

## 7 Erweiterte Interpolations- und Approximationsmethoden

Die Qualität der Interpolation, sowohl im Ort als auch in der Zeit, sowie die Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit der interpolierten Tiefen sind wesentliche Voraussetzungen für alle abgeleiteten Auswertungen. Insbesondere die enge Verknüpfung der Interpolation mit der Bestimmung der Vertrauenswürdigkeit führte im Berichtszeitraum zur Entwicklung erster Interpolationen auf der Basis von Fuzzy-Zahlen. Die Formulierung auf der Basis der Fuzzy-Zahlen und -Arithmetik erlaubt die geschlossene Behandlung der auftretenden Unschärfen, beginnend bei den eigentlichen Messdaten über die Interpolation bis hin zu abgeleiteten Kenngrößen.

Können keine expliziten Annahmen über das zu verwendende Interpolations- bzw. Approximationsverfahren getroffen werden, so gibt es die Möglichkeit, die Vermessungsdaten zum Training künstlicher Neuronaler Netze (KNN) zu verwenden, welches dann die Geländeoberfläche repräsentiert. Insbesondere beim Übergang zum zeitlich variablen Geländemodell ergeben sich neue Möglichkeiten der Modellbeschreibung.

### 7.1 Fuzzy-Interpolation und Konfidenzbestimmung

Bathymetrische Modelle basieren in der Regel auf Vermessungsdaten, die mit gewissen Messungenauigkeiten behaftet sind. Sowohl diese Unsicherheiten in den Vermessungsdaten selbst als auch die Informationsdefizite bei der Übertragung der punktuellen Vermessung in die Ebene durch Interpolation bzw. Approximation, führen zur Notwendigkeit einer entsprechenden Quantifizierung der Vertrauenswürdigkeit der so ermittelten Tiefenwerte. Die zu berücksichtigenden Unsicherheiten hängen vom Messverfahren, der Interpolation/Approximation und der lokalen Dichte der Vermessungspunkte, verbunden mit den morphodynamischen Verhältnissen, ab.

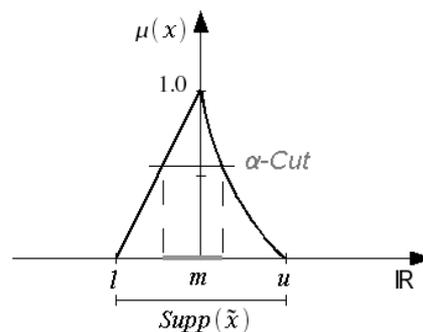
Das Rechnen mit Fuzzy-Zahlen [24] eröffnet die Möglichkeit, die beschriebenen Unschärfen in einer geschlossenen Form zu behandeln. Das Literaturstudium hat gezeigt, dass der Einsatz der Fuzzytheorie in verschiedenen Bereichen des Vermessungswesens in der Vergangenheit angedacht worden ist, jedoch nicht der Schritt zur Interpolation von Geländeoberflächen mit Fuzzy-Zahlen realisiert wurde. Insbesondere die Fuzzy-Interpolation [34] mit ihren unterschiedlichen Facetten ist noch weitestgehend ungenutzt.

#### 7.1.1 Grundlagen der Fuzzy-Zahlen und -Arithmetik

Wird von klassischen Zahlen, beispielsweise der Zahl 2 gesprochen, so wird nur diese Zahl gemeint und nicht beispielsweise die Zahl 1,99. Im Gegensatz zu den klassischen, auch scharf genannten Zahlen, kann bei Fuzzy-Zahlen von „ungefähr 2“ gesprochen werden, wobei 1,99 dazu gehört. Das „ungefähr“ wird durch eine sogenannte Zugehörigkeitsfunktion  $\mu$  beschrieben.

Eine Fuzzy-Zahl  $\tilde{x}$  ist eine konvexe, normalisierte Fuzzy-Menge über den reellen Zahlen, deren Zugehörigkeitsfunktion mindestens stückweise stetig ist und den Wert

$\mu(x) = 1$  für genau ein  $x$  annimmt. Dieses Element  $m$  wird als Nennwert der Fuzzy-Zahl bezeichnet, siehe Abbildung 61.



**Abbildung 61**

Es gibt eine große Vielfalt bei der Definition von Fuzzy-Zahlen. Eine besondere Klasse bilden die sogenannten LR-Fuzzy-Zahlen, bei denen die Zugehörigkeitsfunktion aufgeteilt wird in einen linken und einen rechten Funktionsast, der jeweils monoton fallend ist. Sind die LR-Zugehörigkeitsfunktionen linear, so werden diese Dreiecks-Fuzzy-Zahlen genannt.

Mit allen Fuzzy-Zahlen kann auf der Basis des Erweiterungsprinzips nach Zadeh (1965) mit den bekannten Grundrechenoperationen gerechnet werden. Für die Interpolation sind insbesondere die Multiplikation mit einem Skalar und die Addition von Fuzzy-Zahlen von besonderer Bedeutung. Werden Dreiecks-Fuzzy-Zahlen verwendet, lassen sich die skalare Multiplikation und Addition sehr einfach umsetzen, da als Ergebnis wieder eine Dreiecks-Fuzzy-Zahl herauskommt. Die Multiplikation und Division von Fuzzy-Zahlen und auch fast alle anderen denkbaren Funktionen müssen mittels des Erweiterungsprinzips aufwändig berechnet werden.

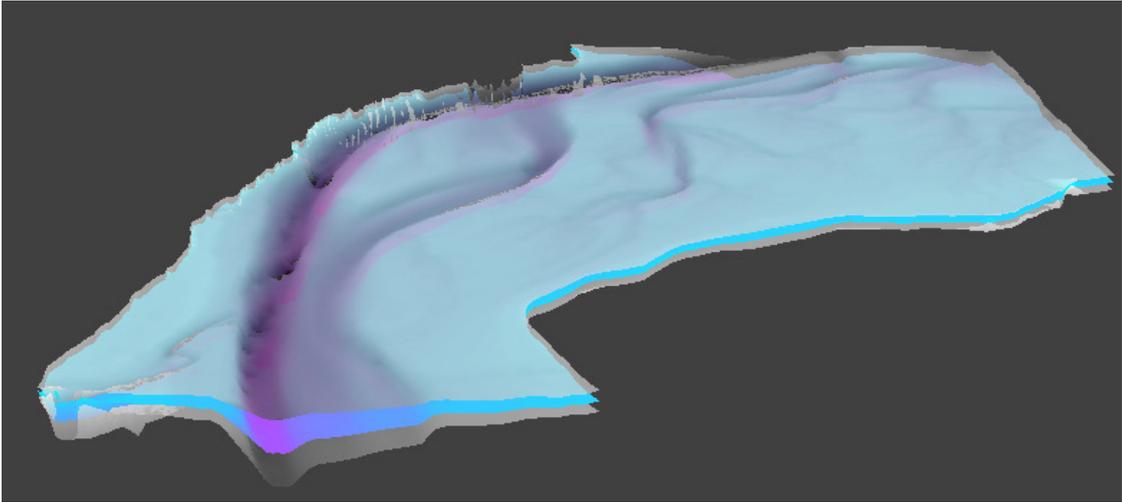
Wird der wohlbekanntere Interpolationsansatz auf der Basis von einer scharfen Höhe  $z$  und einer Ansatzfunktion  $\phi(x)$  auf unscharfe Vermessungen  $\tilde{z}_i$  übertragen, so führt dies zur folgenden Fuzzy-Interpolation:

$$\tilde{z}(x) = \sum \tilde{z}_i \cdot \phi(x) \quad \text{Gl. 7-1}$$

### 7.1.2 Fuzzy-Finite-Elemente-Interpolation

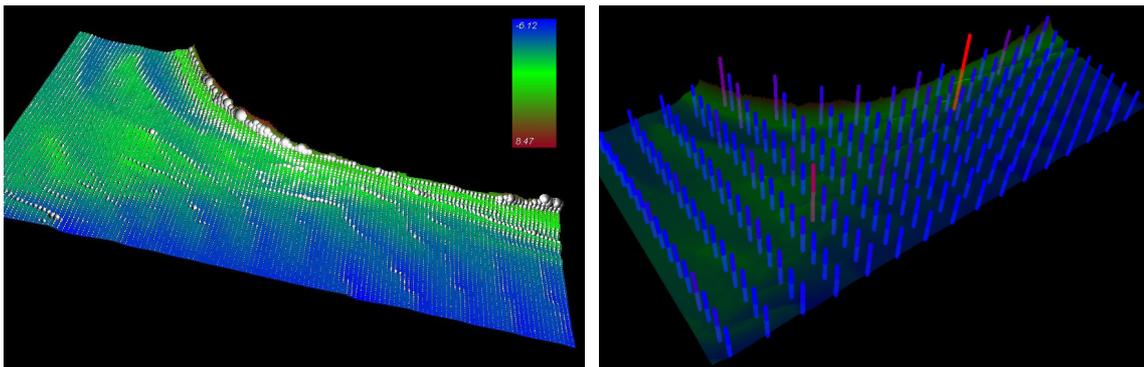
Eine der einfachsten und effektivsten Interpolationen ist die bereichsweise lineare Interpolation auf Dreiecksnetzen. Das Verfahren dieser Finiten-Elemente-Interpolation kann auf in der Höhe unscharfe Stützstellen übertragen werden. Bei der Interpolation an einer Stelle wird dann eine Fuzzy-Zahl der interpolierten Höhe berechnet, z. B. „ungefähr 3.75 m tief“.

In der Abbildung 62 ist der Bereich der Medemrinne im Elbe-Ästuar dargestellt, wobei von einer mittleren Genauigkeit der Messwerte in der Höhe von  $\pm 15\text{cm}$  ausgegangen wurde. Die mittlere Fläche beschreibt die Nenntiefe und die obere und untere Fläche beschreiben die Grenzen des Konfidenzbereiches.



**Abbildung 62** Fuzzy Finite-Elemente-Interpolation der Elbefahrrinne im Bereich der Medemrinne (100-fach überhöht).

Die Berücksichtigung der Lageunschärfe in den Vermessungsdaten wie auch der Erhöhung der Unschärfe durch die Interpolation selbst ist Gegenstand aktueller Untersuchungen [25].



**Abbildung 63** Verschiedene Darstellungsmöglichkeiten von relativer Unschärfe aus Interpolationen am Beispiel der Tiefeninterpolation vor Langeoog.

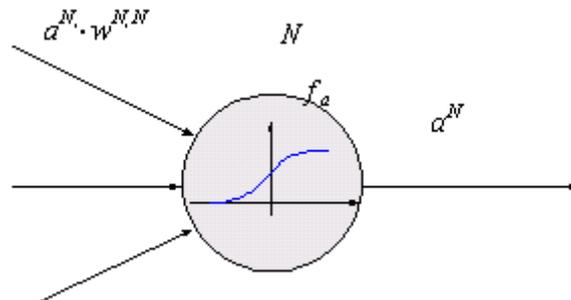
## 7.2 Künstliche Neuronale Netze

Beim Übergang von punktuellen Informationen in der Ebene auf eine flächige Darstellung werden Interpolations- und Approximationsverfahren eingesetzt. Klassische Verfahren, wie die Dreiecks- bzw. Shepard-Interpolation, geben in der Regel Basisfunktionen und zugehörige Berechnungsvorschriften vor.

Künstliche Neuronale Netze stellen eine ganz andere Herangehensweise dar. Hierbei wird die Berechnungsvorschrift nicht explizit vorgegeben, sondern auf der Basis von Daten trainiert ([29] und [30]). Diese Herangehensweise eröffnet in Zukunft neue Perspektiven bei der datenbasierten Modellierung morphodynamischer Gestaltungsvorgänge, da dadurch die Möglichkeit gegeben wird weitere Parameter zu berücksichtigen.

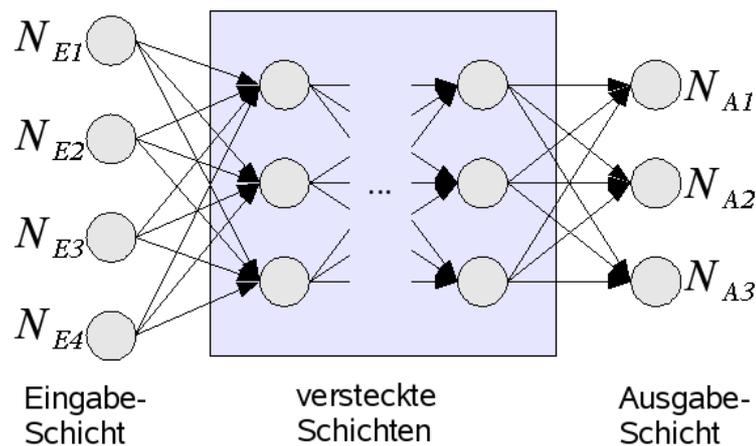
### 7.2.1 Grundlagen künstlicher Neuroner Netze

Mit künstlichen Neuronalen Netzen (KNN) wird versucht, die Funktionsweise des Gehirns und dessen Abstraktionsvermögen zur Erkennung von funktionalen Zusammenhängen auf den Rechner zu übertragen. Ein KNN kann als bipartiter Graph mit zwei Knotenmengen interpretiert werden. Die erste Knotenmenge besteht aus Neuronen, die zweite aus Synapsen.



**Abbildung 64** Schematische Darstellung eines Neurons

Die Mengen werden durch Kanten, entsprechend den natürlichen Nervenbahnen, miteinander vernetzt. Häufig wird eine Synapse lediglich durch einen veränderlichen skalaren Wert repräsentiert, dem Synapsengewicht. So wird durch eine multiplikative Verknüpfung zwischen dem Gewicht und der sog. Aktivität eines Neurons eine Abschwächung oder Verstärkung eines Signals realisiert. Dadurch vereinfacht sich der bipartite Graph zu einem schlichten gewichteten Graphen, bei dem die Kanten mit Synapsengewichten behaftet sind. Wird nur die Klasse der Feedforward-Netze betrachtet, so ist der Graph auch noch gerichtet. Durch die Anordnung der Neuronen in Schichten erhält man ein sogenanntes Multilayer-Perceptron-Netz (MLP), welches im Weiteren für die Approximation von Geländeoberflächen verwendet wurde.



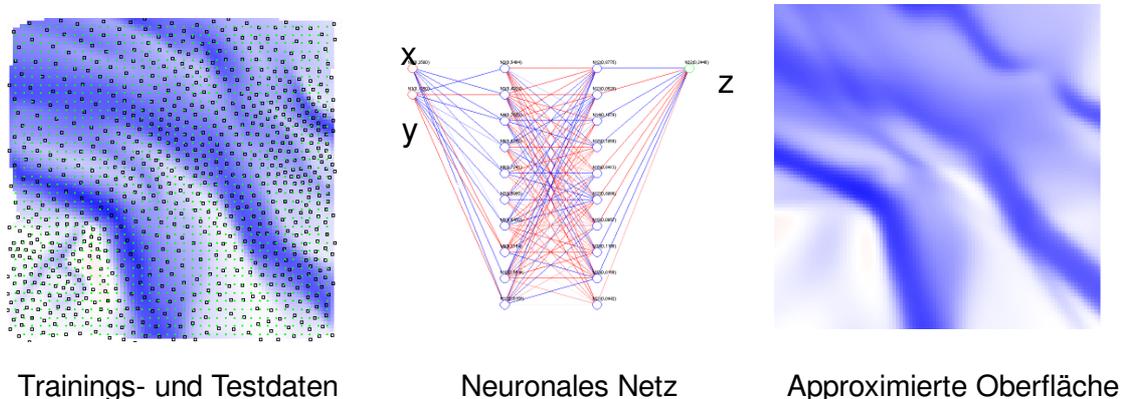
**Abbildung 65** Multilayer-Perceptron mit Synapsengewichten an den Kanten

Sind die Synapsengewichte bekannt, so beschreibt ein KNN einen funktionalen Zusammenhang zwischen den an der Eingangsschicht angelegten Größen und den an der Ausgangsschicht vom KNN erzeugten Ausgangsgrößen.

Die Bestimmung der geeigneten Synapsengewichte erfolgt in einem Lernprozess. Das Lernen (Training) ist ein iterativer Prozess mit dem Ziel, die unbekannt Zusammenhänge möglichst generalisiert abzubilden, so dass den bekannten Eingaben die gewünschten Ausgaben zugeordnet werden. Die Bewertung des Lernerfolgs, erfolgt durch Minimierung des Fehlers  $E$ . Dieser ergibt sich aus der Differenz der Ausgabe, die durch das Netz produziert wurde, und der tatsächlich richtigen Ausgabe. Für die verwendeten Multilayer-Perceptron-Netze wird ein Backpropagation-Lernverfahren eingesetzt.

### 7.2.2 Approximation im Raum

Die am Institut für Bauinformatik entwickelten Klassen für künstliche Neuronale Netze wurden an die besonderen Anforderungen der Bathymetrieapproximation angepasst und in das ImTG-Projekt integriert. Die verwendeten Netze haben eine Input-Schicht bestehend aus zwei Neuronen für die  $x$ - und  $y$ -Koordinate, in der Regel zwei versteckte Schichten mit jeweils zehn Knoten und eine Output-Schicht mit einem Neuron für die zu ermittelnde  $z$ -Koordinate. Sowohl die Eingangsneuronen als auch das Ausgangsneuron werden entsprechend den bathymetrischen Gegebenheiten skaliert. Zunächst wurden an akademischen Oberflächen die notwendigen Netzstrukturen und Aufteilungen von Trainings- und Testdaten untersucht. Das Ergebnis eines solchen trainierten KNN ist in der Abbildung 66 für ein Beispielgebiet im Jade-Weser-Ästuar dargestellt.



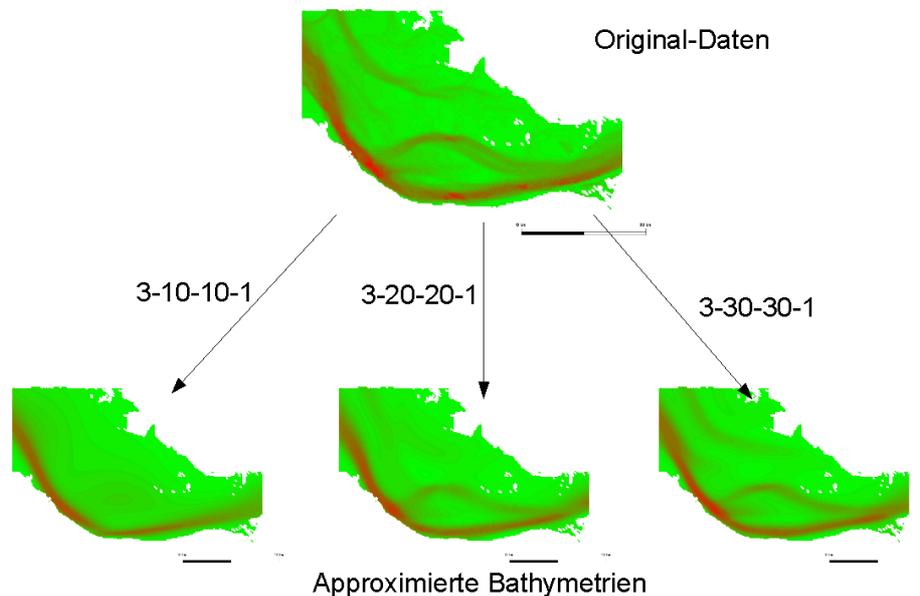
**Abbildung 66** Approximation mit künstlichen Neuronalen Netzen

Die Wahl einer geeigneten Netztopologie erfolgt in der Regel auf der Basis von Erfahrungen. Im Rahmen des Projektes sind hierzu Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt worden [26].

### 7.2.3 Approximation in Raum und Zeit

Neben dem Training der Tiefenverteilung zu einem Zeitpunkt konnte gezeigt werden, dass künstliche Neuronale Netze auch die zeitliche Entwicklung der Bathymetrie approximieren können. Hierzu wurde neben den Eingangsneuronen für die  $x$ - und  $y$ -Koordinate ein weiteres Input-Neuron für die Zeit verwendet. Für diese Modelle muss die Mächtigkeit der versteckten Schichten erhöht werden. Dies konnte an entsprechenden Sensitivitätsstudien nachgewiesen werden (siehe Abbildung 67). Die

Wahl einer geeigneten Netztopologie, die nicht nur die örtliche Varianz der Tiefenverteilung sondern auch deren zeitliche Entwicklung abbilden kann, ist noch schwieriger als bei einer rein örtlichen Approximation.



**Abbildung 67** Sensitivitätsstudien für Netztopologie und Trainingsverfahren im Bereich der Elbe

### 7.2.4 Ausblick

Die wesentlichen Strukturen der Bathymetrien konnten in Raum und Zeit mit künstlichen Neuronalen Netzen hinreichend approximiert werden.

Die Berücksichtigung weiterer, vor allem physikalischer Größen ist Gegenstand aktueller Forschungen und wird zu einer weiteren Verbesserung der Trainingsergebnisse führen.

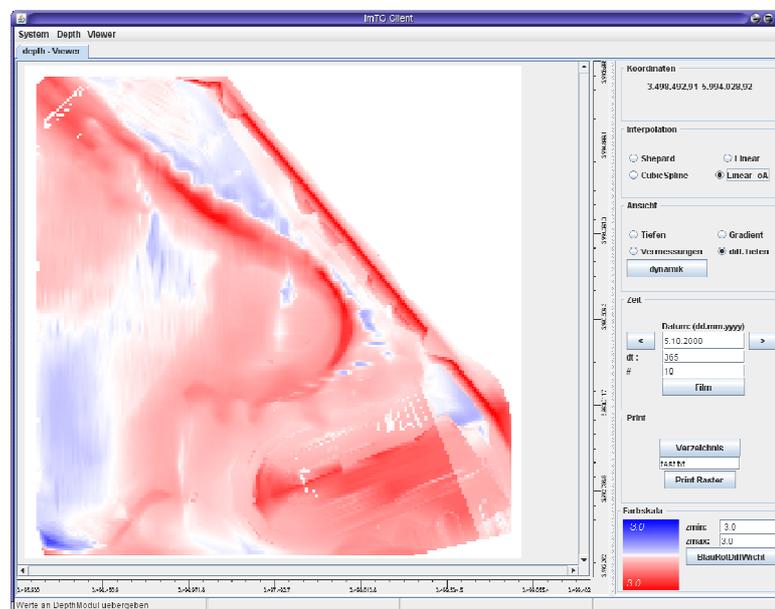
Für die Nutzung künstlicher Neuronaler Netze bei prognostischen Fragestellungen, wird die Verknüpfung von Vermessungsdaten, integraler meteorologischer Daten und Erosions- und Sedimentationsraten notwendig sein. Das Potential Künstlicher Neuronaler Netze für Approximationsaufgaben und prognostische Verfahren ist noch lange nicht ausgeschöpft.

## 8 Morphologische Analysen

Morphologische Analysen können sowohl auf den zugrundeliegenden Vermessungen und den in diesen enthaltenen Vermessungspunkten, als auch auf der Basis eines räumlich-zeitlich kontinuierlichen digitalen bathymetrischen Modell durchgeführt werden. Die Generierung abgeleiteter Daten, kann zu einer Hervorhebung unterschiedlicher Aspekte der morphologischen Entwicklung eines Gebiets führen.

### 8.1 Identifikation von Erosion und Sedimentation

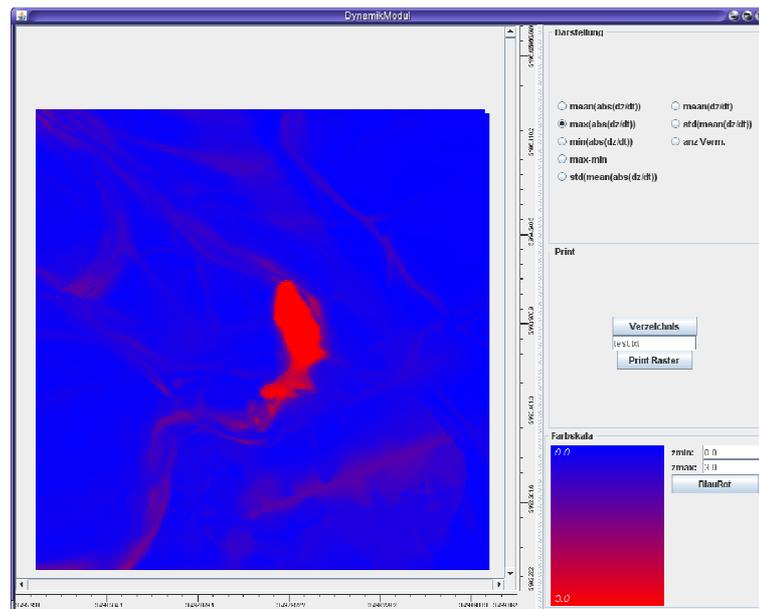
Werden Vermessungen, die zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommen wurden, miteinander verglichen, so können Erosions- bzw. Sedimentationsbereiche identifiziert werden. Über die Bestimmung der Höhendifferenzen kann ebenfalls eine Aussage über die mittlere jährliche Änderungsrate für den betrachteten Zeitraum gemacht werden.



**Abbildung 68** Zehnjährige Tiefenänderung in der Meldorfer Bucht (1990-2000)

Wird die digitale Bathymetrie als kontinuierlich in Raum und Zeit aufgefasst, so lässt sich an jeder Stelle ein Zeitstrahl betrachten, der die Tiefenentwicklung an einer Stelle über die Zeit beschreibt. Aus diesen Zeitstrahlen lassen sich beispielsweise mittlere bzw. maximale Änderungsraten ableiten.

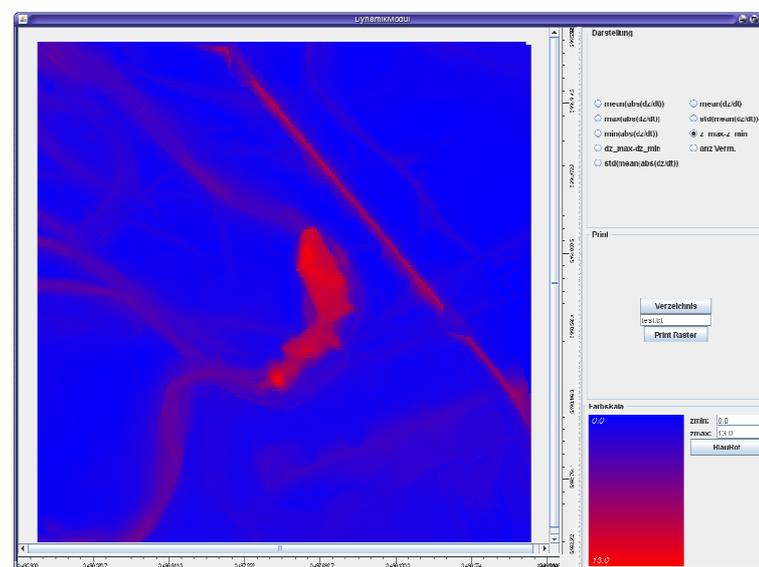
In der Abbildung 69 ist die Baggerstelle für den Bau des Deiches in der Meldorfer Bucht und die darauf folgende morphologische Reaktion der Umgebung gut zu erkennen.



**Abbildung 69** Maximale Erosions- und Sedimentationsraten in der Melderfer Bucht.

## 8.2 Morphologischer Raum

Neben den Erosions- und Sedimentationsraten kann der morphologische Raum zur Beschreibung der morphologischen Aktivitäten einer Region abgeleitet werden. Unter dem Morphologischen Raum an einem Ort  $\Delta z = z_{\max} - z_{\min}$  wird die Differenz zwischen der größten und der kleinsten beobachteten Tiefe verstanden.



**Abbildung 70** Morphologischer Raum für die Melderfer Bucht

Die größten Erosionen in der Melderfer Bucht sind in Bereichen der Insel Trischen, in der Norder-Piep und im inneren Teil der Melderfer Bucht zu finden. Die Reaktion auf die Eindeichung der Bucht ist deutlich zu erkennen.

### 8.3 Morphologische Dynamik

Zur Beschreibung der Dynamik, mit der sich der Gewässerboden verändern kann, werden die Vermessungen an einem Ort untersucht. Zu je zwei Vermessungen lassen sich die Erosions- bzw. Sedimentationsraten bestimmen. Unter der morphologischen Dynamik  $\Delta \partial z = \partial z_{\max} - \partial z_{\min}$  wird die Differenz aus der maximalen Sedimentationsrate und der maximalen Erosionsrate verstanden.

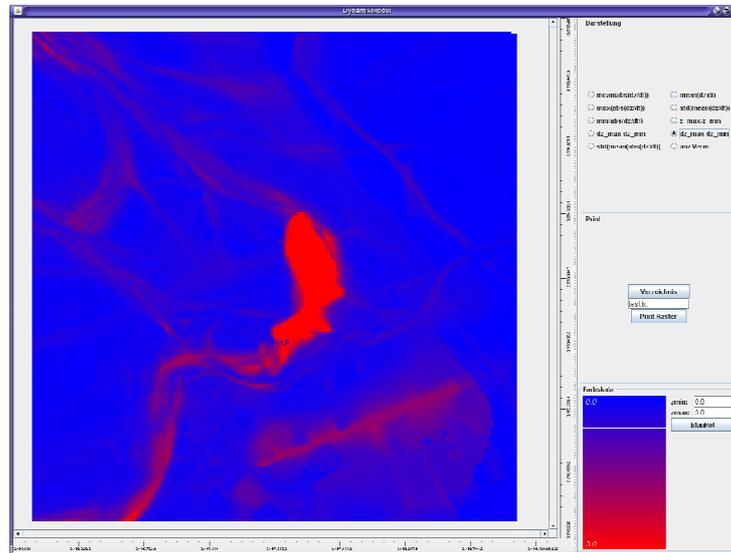


Abbildung 71 Morphologische Dynamik in der Melderer Bucht

### 8.4 Sedimentbilanz

Durch Festlegen von Kontrollpolygonen lassen sich für diese ausgezeichneten Gebiete Volumenbilanzen berechnen.

Werden zusätzlich Höhenniveaus betrachtet, können Aussagen bezüglich dieser Höhenbereiche getroffen werden.

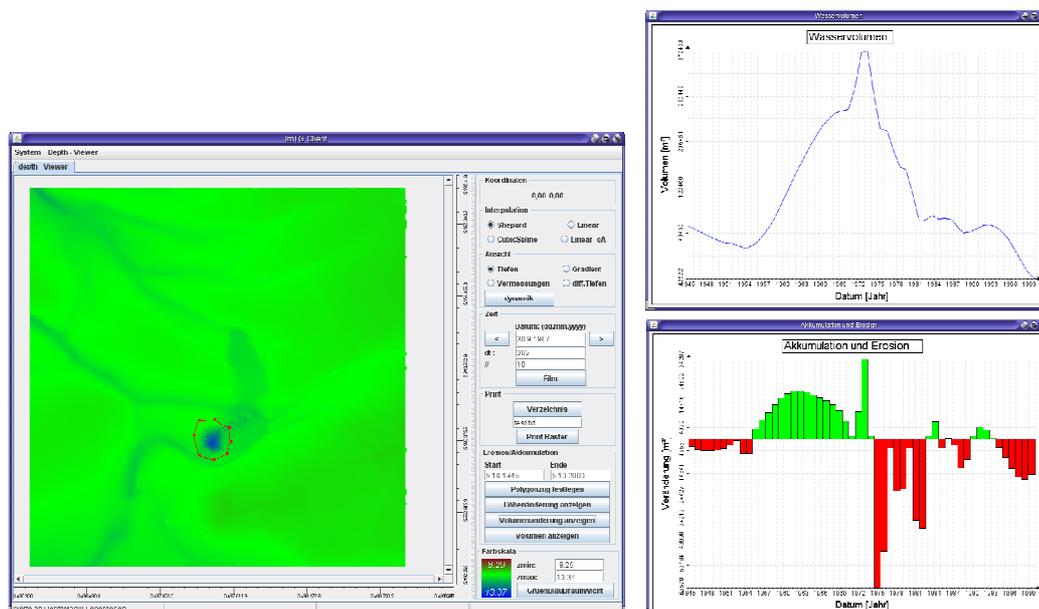


Abbildung 72 Kontrollpolygon (links), in welchem das Wasservolumen (oben) und die Änderung des Wasservolumens (unten) bestimmt wurde.

## 8.5 Morphologische Geschwindigkeiten

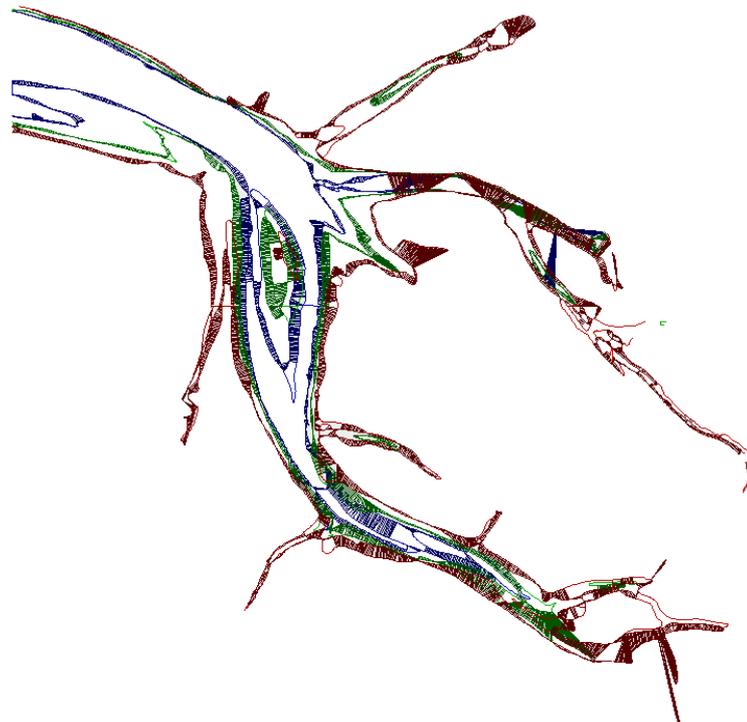
Bei der Betrachtung digitaler Geländemodelle in Raum und Zeit als dreidimensionale kontinuierliche Funktion  $z(x,y,t)$ , können aus den Vermessungsdaten zunächst innerhalb einer Vermessung die Gradienten ( $dz/dx$  und  $dz/dy$ ) bestimmt werden.

Werden Strahlen in der Zeit durch die Vermessungen betrachtet, so lassen sich die zeitlichen Änderungsraten ( $dz/dt$ ) bestimmen und somit Erosions- und Sedimentationsbereiche identifizieren.

Die örtliche Verlagerung von Strukturen (z. B. Rinnen) lassen sich so jedoch nicht beschreiben.

Unter der morphologischen Geschwindigkeit ist die Geschwindigkeit zu verstehen, mit der sich Charakteristiken eines Gebietes bewegen. Hierzu gehören Küstenlinien, Rinnen, Transportkörper usw., die in der Regel durch Isolinien und Bruchkanten beschrieben werden können.

Stehen digitalisierte Isolinien von Karten zur Verfügung, wie dies zum Beispiel bei der Meldorfer Bucht der Fall ist, können diese direkt für weitere Betrachtungen verwendet werden. Aufbauend auf den Algorithmen der Isolinien-Interpolation können die Abstände zwischen den Isolinien zu zwei verschiedenen Zeitpunkten bestimmt werden. Mit den Zeitangaben der Vermessungen lassen sich so in unkritischen Bereichen die zugehörigen morphologischen Geschwindigkeiten ableiten. Durch die Verformung der Isolinien kommt es allerdings in den meisten Bereichen zu Fehlinterpretationen. Hierzu müssen noch Methoden zur Strukturerkennung und Verfolgung entwickelt und implementiert werden.



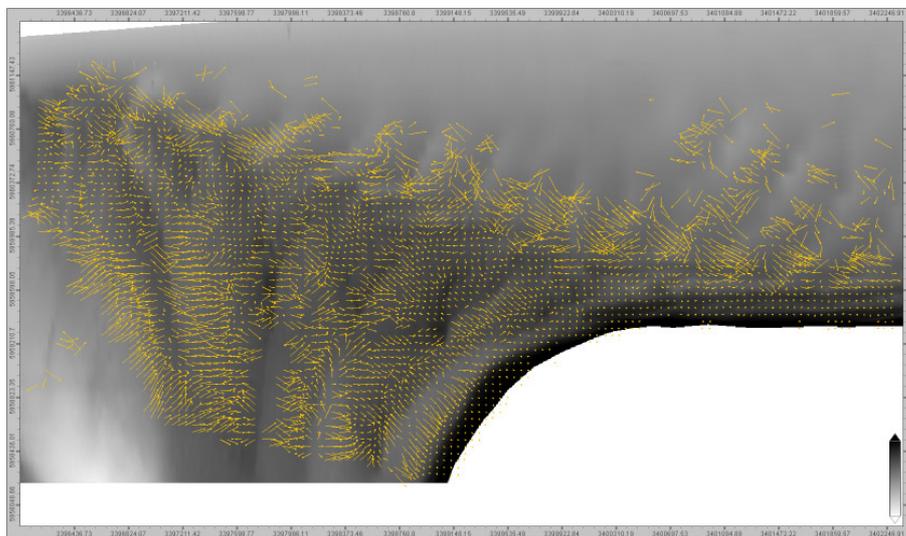
**Abbildung 73** Isolinienbasierte Bestimmung der morphologischen Geschwindigkeiten in der Meldorfer Bucht

Eine alternative Berechnung der morphologischen Geschwindigkeiten, also der Geschwindigkeit, mit der sich Isolinien in der Zeit bewegen, eröffnet der Satz über implizite Funktionen (Gl. 8-1). Die Isolinie zum Wert  $k$  kann über die implizite Funktion  $z((x, y), t) - k = 0$  beschrieben werden.

Der Satz über Implizite Funktionen liefert nun, überall da, wo die lokalen Gradienten nicht verschwinden, neben der lokalen Existenz der Funktionen  $x(t)$  und  $y(t)$  auch deren zeitliche Ableitung, die als morphologische Geschwindigkeiten bezeichnet werden können.

$$\frac{\partial x(t)}{\partial t} = -\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^{-1} \cdot \frac{\partial z}{\partial t} \quad \text{und} \quad \frac{\partial y(t)}{\partial t} = -\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^{-1} \cdot \frac{\partial z}{\partial t} \quad \text{Gl. 8-1}$$

Diese Berechnungen wurden zunächst auf der Grundlage gerasterter Daten vor Langeoog durchgeführt und ergaben morphologische Geschwindigkeiten von bis zu 1300 m/Jahr.



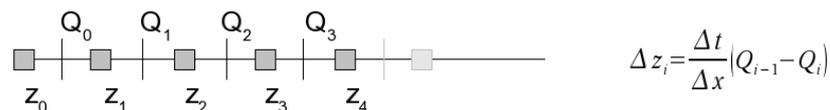
**Abbildung 74** Tiefenverteilung 2002 und morphologische Geschwindigkeiten vor Langeoog

### 8.6 Resultierender Transport

Die Kenntnis der resultierenden Sedimenttransportraten, die die beobachteten Tiefenveränderungen hervorrufen, kann zur Optimierung von Küstenschutz und -entwicklungskonzepten beitragen und als wesentliche Gütekriterien zur Validierung prozessbasierter numerischer Simulationsmodelle herangezogen werden.

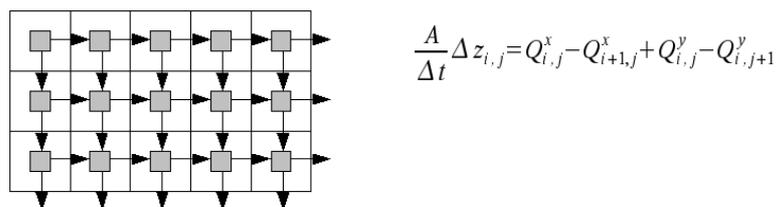
Die Entwicklung des Gewässerbodens genügt für jedes Kontrollvolumen einer Kontinuitätsbedingung und kann durch integrale oder differentielle Kontinuitätsgleichungen beschrieben werden. Im Rahmen prozessbasierter numerischer Modelle wird die Bodenevolution auf der Basis von Finiten Differenzen, Finiten Volumen oder Finiter-Elemente-Verfahren gelöst. In diesen Modellen werden die Sedimenttransportraten auf der Basis berechneter Strömungsgeschwindigkeiten und Seegangparameter berechnet.

Zur Berechnung der resultierenden Sedimenttransportraten ist es gelungen ein inverses Finites Volumenverfahren zu entwickeln. Für einfache Geometrien, wie beispielsweise ein eindimensionales Flussmodell mit festem Rand ( $dz=0$ ), kann die Finite Element Methode einfach invertiert werden. Wie in Abbildung 75 zu sehen, ist im eindimensionalen Fall die Anzahl der unbekannt resultierenden Transporte  $Q_i$  gleich denen der gemessenen Tiefenänderungen  $\Delta z_i$



**Abbildung 75** Schematische eindimensionale Finite Volumen Approximation

Leider ist eine solche einfache Invertierung des Finiten Volumen Verfahrens im allgemeinen Fall nicht möglich. Schon im zweidimensionalen Fall eines regulären Gitters ist die Anzahl der unbekannt resultierenden Transporte  $Q_{ij}$  über die Zellränder mehr als doppelt so groß wie die gemessenen Tiefenänderungen  $\Delta z_{ij}$  über ein Zeitintervall  $\Delta t$  in den Zellzentren.

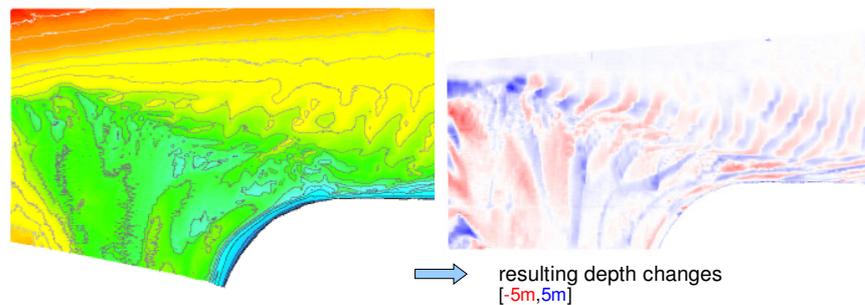


**Abbildung 76** Schematische zweidimensionale Finite Volumen Approximation auf einer regulären Zerlegung

Um auch im ebenen Fall resultierende Transporte zu berechnen, wurde ein iterativer Algorithmus entwickelt. Zunächst wird eine Startverteilung der Transporte  $Q_{ij}$  generiert. Dies geschieht zufällig oder die Startverteilung wird aus einem prozessbasierten Modell abgeleitet. In einem zweiten Schritt werden auf der Basis dieser Transporte mittels einer klassischen Finiten-Elemente-Approximation die Tiefenänderungen an den Zellmittelpunkten bestimmt. Die Differenz zwischen der beobachteten Tiefenänderung und der berechneten Tiefenänderung wird nun genutzt, um die Transportraten  $Q_{ij}$  über die Gebietsränder zu korrigieren. Diese Prozedur wird solange durchgeführt bis keine Verbesserung der Ergebnisse mehr erzielt werden.

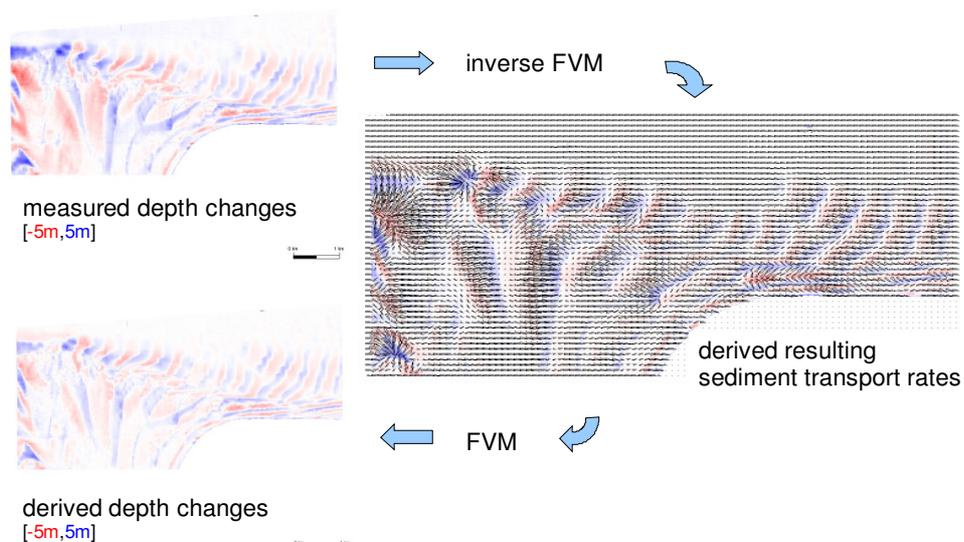
### 8.6.1 Resultierende Transporte vor der Insel Langeoog

Für einen Küstenbereich an der Westspitze der Insel Langeoog wurden, ausgehend von zwei konsistenten Bathymetrien (2002 und 2003), resultierende Transporte berechnet, die zu der beobachteten Tiefenänderung führen würden. Die konsistenten Bathymetrien lagen als reguläres Raster mit einer Rasterweite von 5m vor.



**Abbildung 77** Tiefenverteilung (Isoflächen 2002, Isolinien 2003) und resultierende Tiefenänderungen zwischen 2002 und 2003

In der Abbildung 77 sind auf der linken Seite die Tiefenverteilungen und auf der rechten Seite die Erosions- und Sedimentationsbilanzen für ein Jahr dargestellt. Die roten Bereiche stellen Erosion und die blauen Sedimentation dar. Gut zu erkennen ist das Wandern der Unterwasserstrukturen. Ausgehend von den Tiefenverteilungen der Jahre 2002 und 2003 wurden auf der Basis des inversen Finite-Volumen-Verfahrens die resultierenden Sedimenttransportraten bestimmt. Diese resultierenden Transportraten wurden dann wieder in ein Finite-Volumen-Verfahren eingesetzt, um die resultierende Bathymetrie des Jahres 2003 zu bestimmen (siehe Abbildung 78).



**Abbildung 78** Inverse Finite Volumen Approximation

Die resultierenden Sedimenttransportraten sind bis auf einen zugrundeliegenden quasikonstanten Grundtransport eindeutig. Die Bestimmung dieses Grundtransportes muss durch Einbettung in prozessbasierte morphodynamische Simulationen erfolgen bzw. durch den Aufbau entsprechender Modellhierarchien.

## 9 Optimierung von Messkonzepten

Für die Beurteilung der morphologischen Verhältnisse und Entwicklungen im Küstenvorfeld ist eine den Verhältnissen angepasste Vermessung der Gewässerböden notwendig. Die zu betrachtende Fragestellung bzw. der Grund einer bathymetrischen Vermessung beeinflusst ganz wesentlich die Planung der Vermessung. So werden beispielsweise regelmäßige Vermessungen der Schifffahrtsstraßen durchgeführt, um die Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt sicher zu stellen. Vermessungen erfolgen hierbei im Wesentlichen im Bereich der Schifffahrtsstraßen und unter Detektion der geringsten Wassertiefen.

Im Folgenden werden aktuelle Messkonzepte beschrieben und Optimierungspotentiale, basierend auf digitalen bathymetrischen Modellen in Raum und Zeit, aufgezeigt.

### 9.1 Konzeption von Vermessungen für bathymetrische Daten

Die in den Verwaltungen umgesetzten Messkonzepte zur Beobachtung morphologischer Entwicklungen können als mehrstufig bezeichnet werden. Die erste Stufe umfasst regelmäßige Messungen, die unabhängig von z. B. eingetretenen Sturmflutereignissen durchgeführt werden. Hinzu kommen Bedarfsmessungen nach schweren Sturmfluten, ergänzende Messungen in hochdynamischen Bereichen und im Zusammenhang mit Baumaßnahmen.

#### 9.1.1 Regelmessungen

Regelmäßige Vermessungen werden in der Regel vom BSH und dem WSV zur Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt durchgeführt. Zusätzlich erfolgt eine regelmäßige Vermessung des Küstenvorfelds, entsprechend eines Beschlusses des KFKI aus dem Jahre 1974, in jeweils 3-jährigen Kampagnen alle fünf (später sechs) Jahre (AG Synopse, s. KFKI-Homepage). Neben diesen Aufnahmen des Gewässerbodens werden für besonders kritische Bereiche zusätzliche regelmäßige terrestrische Vermessungen durchgeführt und in der AG-Synopse des KFKI koordiniert. Historisch gehören hierzu die regelmäßigen Aufnahmen von Küstenprofilen und seit der Jahrtausendwende luftgestützte Verfahren wie Laserscanning und Orthophotos.

#### 9.1.2 Bedarfsmessungen

Nach extremen Wettersituationen, welche starke morphologische Veränderungen im Küstenbereich verursachen können, werden häufig sogenannte Bedarfsmessungen durchgeführt. Diese bilden die Grundlage für mögliche Sofortmaßnahmen im Bereich des Küstenschutzes. Zu weiteren Bedarfsmessungen kommt es unter anderem für die Planung von Insel- und Küstenschutzkonzepten.

### 9.1.3 Verkehrssicherungspeilung

Die Ästuare der deutschen Nordseeküste als auch große Teile des Küstenvorfeldes sind bedeutende nationale und internationale Schifffahrtsstraßen. Um auf diesen Schifffahrtsstraßen die Befahrbarkeit sicher zu stellen, werden dort regelmäßige Verkehrssicherungspeilungen durchgeführt. Diese Vermessungen sind darauf ausgerichtet mögliche Untiefen aufzufinden bzw. Schiffsabladetiefen festzulegen. Dies ist bei der Nutzung für morphodynamische Fragestellungen zu berücksichtigen und sollte in den Metadaten zu den Vermessungen protokolliert werden.

### 9.1.4 Beweissicherung

Im Rahmen von Baumaßnahmen wird in der Regel eine Beweissicherung durchgeführt. Unter Beweissicherung wird die Aufnahme des Zustandes vor Beginn der Bauarbeiten, während der Baumaßnahmen und danach verstanden. Beweissicherungen dienen der Dokumentation natürlicher und durch anthropogene Eingriffe verursachter Veränderungen. Werden morphologische Reaktionen im Küstenbereich erwartet, gehören auch regelmäßige Vermessungen bzw. das Zusammentragen und die Analyse von Vermessungen unterschiedlicher Ämter und Institutionen dazu. Entsprechend der durchgeführten Eingriffe kann der zu dokumentierende Bereich kleine Ausdehnungen haben oder auch ganze Ästuare umfassen.

## 9.2 Messkonzept für die Ostfriesischen Inseln

Die regelmäßigen Peilungen des BSH, die das Gebiet seeseitig der Inseln abdecken, sind von großer Bedeutung für die morphologischen Untersuchungen im Projektgebiet, da der NLWKN dort nicht regelmäßig zusätzlich peilt. In Absprache mit dem BSH führt die zuständige WSV außerdem Peilungen der Schifffahrtsstraßen durch (AG Synopse, s. KFKI-Homepage), deren Ergebnisse dem NLWKN ebenfalls zur Verfügung stehen.

Seit 1999 liegen Daten einer regelmäßigen Befliegung der Inseln mit einem Laserscanner vor. Die Befliegung erfolgt für die Erosionsbereiche jährlich. Eine Gesamtaufnahme mittels Laserscan wird für eine Insel pro Jahr angestrebt, was im Durchschnitt zu einem Intervall von sieben Jahren führt.

Von den hochdynamischen Riffbögen zwischen den Inseln werden jedes Jahr bei einer Befliegung Orthofotos aufgenommen. Die Befliegung findet jeweils bei Niedrigwasser statt, so dass die trockenfallenden, über Tideniedrigwasser (Tnw) liegenden Bereiche bestimmt werden können.

Das Regelmesskonzept beinhaltet außerdem die terrestrische Vermessung von Strandprofilen auf den Inseln, die mindestens jährlich aufgenommen werden. Erosionsbereiche werden regelmäßig zweimal pro Jahr und relativ unkritische Bereiche im Osten der Inseln zum Teil alle zwei Jahre vermessen. Die Profile haben abhängig von ihrer Lage und der dortigen Erosionsgefahr einen unterschiedlichen Abstand zueinander. Die Abstände reichen von 25-50 m in Bühnenfeldern, über 50-

250 m in den Erosionsbereichen ohne Bühnen, bis zu 1000 m in den übrigen Strand- und Wattbereichen.

### **Bedarfsmessungen**

Wegen der Abstände zwischen den einzelnen Profilen werden nach schweren Sturmfluten die Abbruchkanten durchgängig terrestrisch vermessen. So können örtlich auftretende, zwischen den Profilen liegende Bereiche besonders starker Erosion identifiziert werden. Für kurzfristige Einschätzungen der Dünen-situation nach Sturmfluten und als Entscheidungshilfe, ob die hier genannten zusätzlichen Vermessungen notwendig sind, dienen sogenannte Pflöckmessungen. Dafür sind für jedes Profil oberhalb der Dünenabbruchkanten in einigem Abstand Pflöcke im Boden vorhanden, deren Standort bekannt ist. Eine einfache Abstandsmessung von diesen Pflöcken zur Abbruchkante vor und nach einer Sturmflut ermöglicht eine erste Aussage über die Stärke der Dünenabbrüche durch das jeweilige Ereignis. Anhand der so gewonnenen Werte kann dann entschieden werden, ob und in welchem Umfang eine durchgängige Vermessung der Abbruchkanten nötig ist.

Falls erforderlich, werden zeitgleich zu der Laserscan-Befliegung auch Orthofotos der Inseln aufgenommen. Dies geschah zuletzt 2007.

Im Rahmen von Vorarbeiten für die Planung von Insel- und Küstenschutzkonzepten und Maßnahmen werden außerdem gezielt Einzelpeilungen durchgeführt, die nicht zu den Regelmessungen seitens des BSH gehören.

Alle terrestrischen Vermessungen können mit NLWKN-eigenem Personal durchgeführt werden, wohingegen Laserscanbefliegungen und großflächige Peilungen wegen der nötigen Spezialgeräte an Fachfirmen vergeben werden.

### **9.3 Messkonzept für Dithmarscher Bucht**

Im Zuge der Eindeichung der Meldorfer Bucht wurde 1969/1970 eine Vorvermessung durchgeführt. Als Messprogramm im Rahmen der Beweissicherungsmaßnahmen wurde 1971 festgelegt, dass eine erste Wiederholungsvermessung 1973 nach Fertigstellung des ersten Abschnittes und 1978 eine weitere nach Fertigstellung des zweiten Abschnittes durchzuführen ist. Danach sollten weitere drei Wiederholungsvermessungen erfolgen. Dieses Programm wurde mit einer zusätzlichen Zwischenvermessung 1975 umgesetzt. Nach Bauabschluss 1978 erfolgten Wiederholungsvermessungen 1981, 1984 und 1987. Eine flächendeckende Vermessung der Meldorfer Bucht erfolgte danach letztmalig 2002, im Rahmen des Grundlagenmessprogrammes.

### **9.4 Messkonzept für das Elbeästuar**

Die bathymetrischen Vermessungen in der Elbmündung werden in Abhängigkeit von Gebiet, Tiefe (Rinnen / Wattplatten) und Aufgabenstellung von verschiedenen Institutionen in unregelmässigen Abständen vorgenommen:

- WSA Cuxhaven (vorwiegend Fächerecholotpeilungen im Fahrwasser - in den Seitenbereichen durch Linienpeilungen mit neuem Peilschiff ab 2010)
- WSA Toenning und BSH (Linienpeilungen),
- HPA (Linienpeilungen im Nationalpark Hamburger Wattenmeer),
- NLWKN (Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer) und
- LKN-SH (Übergangsbereiche zur Meldorfer Bucht).

Größtenteils erfolgt die Aufnahme der Bathymetrie nach wie vor durch Linienpeilungen (Längs- und Querfahrten), die in Zukunft vermehrt durch Fächerecholotaufnahmen ergänzt bzw. ersetzt werden.

Im Frühjahr 2010 ist eine Topographiemessung durch eine Befliegung geplant. Hierbei sollen in diversen Teilgebieten zum Zeitpunkt des lokalen Tideniedrigwassers die Wattflächen vermessen werden. Beginnend bei Scharhörn soll bis Geesthacht die gesamte Tideelbe quasi synoptisch bei Tideniedrigwasser überflogen werden. Durch eine möglichst gleichzeitige Peilung der Unterwassertopographie soll so ein digitales Geländemodell erzeugt werden.

Im Zuge der Beweissicherung zur Fahrrinnenanpassung der Elbe werden durch die Beweissicherungsgruppe die erhobenen Tiefendaten der verschiedenen Ämter und Institutionen zusammengetragen und analysiert. Eigene Vermessungen werden nicht durchgeführt.

Die Entwicklung eines integrierten Vermessungskonzeptes für die Elbmündung, unter Einbindung aller Ämter und Institutionen im Sinne einer synoptischen Bathymetrie- vermessung, steht noch aus. Mit der geplanten Laserscanvermessung der trockenfallenden Flächen sollen hierzu erste Schritte unternommen werden.

### **9.5 Messkonzept für den Küstenabschnitt von Rostock bis Darßer Ort**

Für verschiedenste Aufgabenstellungen der Abteilung Küste ist es notwendig, eine Land- und Seevermessung entlang der Ostseeküste durchzuführen, u. a. für

- Untersuchungen morphologischer Veränderungen
- Zustandserfassung der Küsten
- küstendynamische Veränderungen
- Vorplanung von Küstenschutzmaßnahmen
- Fachpläne und Generalplan
- Projektierung von Küstenschutzmaßnahmen
- Bauwerksüberwachung
- Bauwerksabnahme
- Monitoringprogramme.

Diese Vermessungen liegen leider oft nicht in regelmäßigen Abständen und an gleichen Orten vor und sind auch nicht immer in ihrer Aufgabenstellung und

Messaufnahme identisch, so dass es schwierig war, für das Forschungsprojekt geeignete Messstandorte zu finden, an denen eine ausreichende Anzahl von Vermessungen mit hoher Qualität vorlag (siehe auch Kapitel 3.5).

Erstrebenswert wäre in diesem Fall eine regelmäßige Aufnahme des Zustandes der Küste, um kurzfristig und präzise morphologische Veränderungen und Änderungen im Küstenschutzsystem gezielt zu erkennen und zu bearbeiten. Dabei sollte, gerade bei einer Außenküstenlänge von fast 400 km, auf flächendeckende Aufnahmeverfahren an Land (z. B. Airborne Laserscanning) und in See (Fächerecholot) zurückgegriffen werden. Die vorliegenden Messungen sind sicher ausreichend für die reinen Dienstaufgaben im Zusammenhang mit dem Küsten- und Hochwasserschutz, für Modellierungen ist die Datenlage in Bezug auf Umfang, Wiederholungsraten, Vergleichbarkeit und Zeitreihe nicht oder nur schwer verwertbar.

### 9.6 Anforderungen an zukünftige Messkonzepte

Insbesondere die stetige Weiterentwicklung der Sensoren zur großräumigen und flächendeckenden Erfassung von Morphologiedaten führen zur Notwendigkeit der Anpassung dieser Messkonzepte. Mit der Modellvorstellung der Bathymetrie in Raum und Zeit ergeben sich neue Möglichkeiten, morphologisch aktive bzw. passive Bereiche zu identifizieren und so die Messhäufigkeit den morphodynamischen Bedingungen anzupassen.

Bei der Anpassung der morphodynamischen Messkonzepte sind neben den morphodynamischen örtlichen Randbedingungen zusätzliche Bewertungskriterien heranzuziehen. Als erstes ist hier der gesetzliche Auftrag der Schifffahrtsverwaltungen zur Sicherstellung der Leichtigkeit und Sicherheit des Schiffsverkehrs zu nennen, aber auch die Rahmenbedingungen, die bei einer Beweissicherung nach Baumaßnahmen einzuhalten sind.

Aus Sicht der Beobachtung morphologischer Gestaltungsvorgänge im Bereich der deutschen Küsten sind für die Bewertung der örtlichen Auflösung vor allem die Identifikation von lokalen Maxima bzw. Minima sowie von Bruchkanten wesentliche Kriterien. Die örtliche Auflösung der bathymetrischen Vermessungen hängt jedoch sehr stark von den technischen Eigenschaften der für die Vermessung eingesetzten Geräte ab und kann nur beschränkt beeinflusst werden. Die Auflösung der abgeleiteten Daten kann jedoch beeinflusst werden. Insbesondere bei den zur Verfügung stehenden Laserscandaten wird heute noch keine sinnvolle Reduktion vorgenommen. Die von den Auftragnehmern gelieferten Daten sind in der Regel auf reguläre Raster abgebildet, ohne dabei die Struktur des Geländes zu berücksichtigen. Hier würde sich, insbesondere auch unter dem Aspekt der Höhen- und Lagegenauigkeit noch Optimierungspotential ergeben.

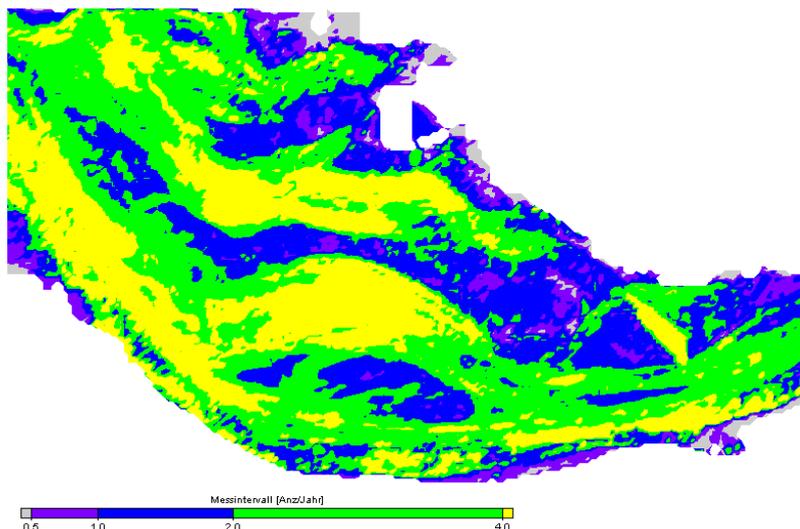
Für die Messhäufigkeit, also die zeitliche Auflösung, spielt die Identifikation von zeitlichen Minima und Maxima und Knicken eine wesentliche Rolle. Bei der Bestimmung der morphologischen Geschwindigkeiten ist die Identifikation von Strukturen und deren Verfolgung eine weitere wesentliche Rahmenbedingung.

Die entwickelten Methoden auf der Basis der digitalen Bathymetrie in Raum und Zeit ermöglichen die Abschätzung minimaler und maximaler Messhäufigkeiten als Indikatoren für die optimale Gestaltung von Messintervallen, die den örtlichen morphologischen Gegebenheiten besser entsprechen.

### 9.7 Untere Abschätzung von Messhäufigkeiten

Trotz einer ständigen Weiterentwicklung in der Messtechnik enthalten die Vermessungsdaten Ungenauigkeiten in der Höhe und der Lage. Diese messtechnisch bedingten Ungenauigkeiten müssen in Verbindung mit den morphodynamischen Gegebenheiten bei der Wahl geeigneter Vermessungszeiträume berücksichtigt werden.

Zunächst kann die Höhengenaugkeit der Vermessungsdaten zur Abschätzung der unteren Grenze der Messhäufigkeit herangezogen werden. Typische Größenordnungen der Höhengenaugkeit sind  $\pm 15$  bis  $\pm 20$ cm, wobei in der Regel auch eine Tiefenabhängigkeit zu beobachten ist.



**Abbildung 79** Minimale Messintervalle (Anzahl der Messungen pro Jahr) für das Elbeästuar

Bei der Festlegung der Messintervalle muss berücksichtigt werden, dass die zu detektierenden Tiefenänderungen signifikant größer sein müssen, als die Höhengenaugkeit der Vermessung. Mit dem digitalen bathymetrischen Modell in Raum und Zeit besteht nun die Möglichkeit, an jedem Ort des betrachteten Gebiets die mittlere historische Tiefenänderungsrate zu bestimmen. Auf deren Grundlage kann dann ein minimales Messintervall festgelegt werden. Ein häufigeres Messen würde versuchen, Tiefenänderungen zu detektieren, die kleiner als die Höhengenaugkeit der Messverfahren sind.

In Abbildung 79 sind die Messintervalle für den Bereich der Medemrinne des Elbeästuars dargestellt, wobei eine Höhengenaugkeit der Messverfahren von  $\pm 15$ cm angenommen wurde. Zugrunde lagen Vermessungsdaten von 1983 bis 2006.

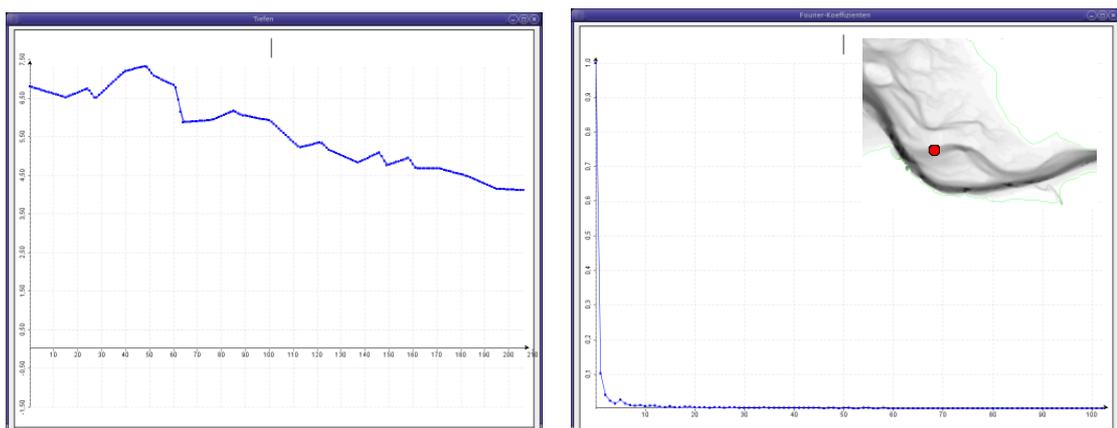
Eine weitere Verbesserung der Aussagen zum minimalen Messintervall wird durch die Berücksichtigung der Lagegenauigkeit in Verbindung mit den Tiefengradienten der Bathymetrie erreicht und erfordert weitere Untersuchungen.

## 9.8 Obere Abschätzung von Messhäufigkeiten

Die Messungenauigkeit zeigt auf, ab wann häufigeres Messen keine zusätzlichen Informationen liefert. Wie häufig sollte jedoch mindestens vermessen werden, um wesentliche morphologische Aspekte überhaupt beobachten zu können?

Das Abtasttheorem der Theoretischen Nachrichtentechnik [33] liefert eine Abschätzung, in welchem Zeitintervall gemessen werden muss, um periodische bzw. quasiperiodische Veränderungen durch die Vermessungsdaten reproduzieren zu können. Auch wenn es sich bei der Morphodynamik der Küstengewässer nicht unbedingt um periodischen Veränderungen handelt, hat sich gezeigt, dass sich das Abtasttheorem eingeschränkt anwenden lässt. Das Ergebnis der Abschätzung mit dem Abtasttheorem gibt an, wie häufig mindestens gemessen werden muss, um gewisse Änderungen zu detektieren.

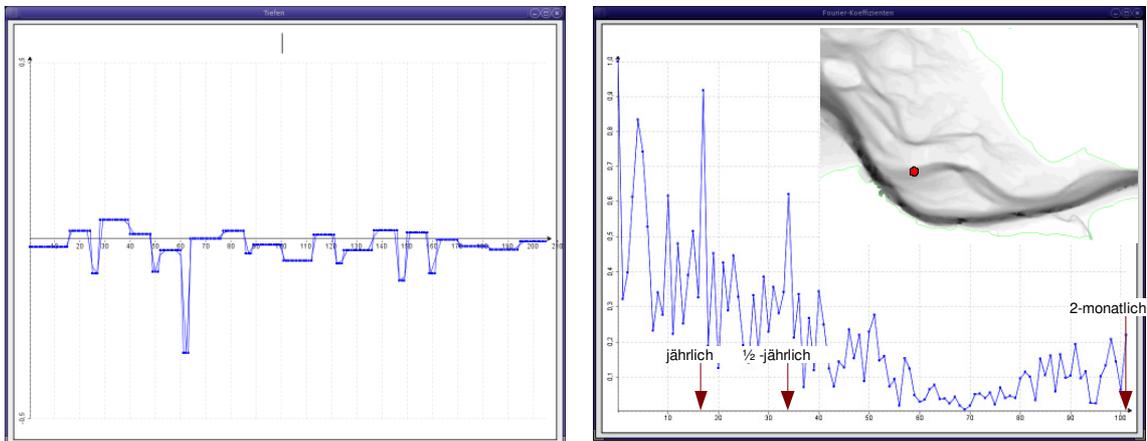
Erste Untersuchungen basieren auf der direkten Betrachtung des zeitlichen Verlaufes der Tiefenentwicklung. Exemplarisch werden im Weiteren jeweils eine Lokation im Watt- und Rinnenbereich dargestellt. Zunächst wurde für die Zeitreihe der Tiefenentwicklung an einem Ort eine Frequenzanalyse mithilfe der Diskreten-Fourier-Transformation (DFT) durchgeführt, um periodische bzw. quasiperiodische Signale in den Daten zu identifizieren. Die identifizierten „Frequenzen“ bilden dann die Grundlage des Abtasttheorems. Die auf diese Art abgeleiteten Spektren weisen keine signifikante Struktur auf, so dass sowohl für Watt- als auch Rinnenbereiche keine Messintervalle auf der Basis der spektralen Betrachtung des Tiefenverlaufes abgeleitet werden konnten.



**Abbildung 80** Tiefenverlauf und zugehöriges Frequenzspektrum

Als Ergebnis der DFT auf der Zeitreihe der Tiefenentwicklung  $z(t)$  ergibt sich, dass nicht die Tiefenentwicklung für die Festlegung der Messintervalle relevant ist, sondern vielmehr die Entwicklung der Sedimentations- und Erosionsraten. Neben der zeitlichen Entwicklung der Tiefe an einem Ort können aus dem digitalen bathymetrischen Modell in Raum und Zeit auch die Sedimentations- und

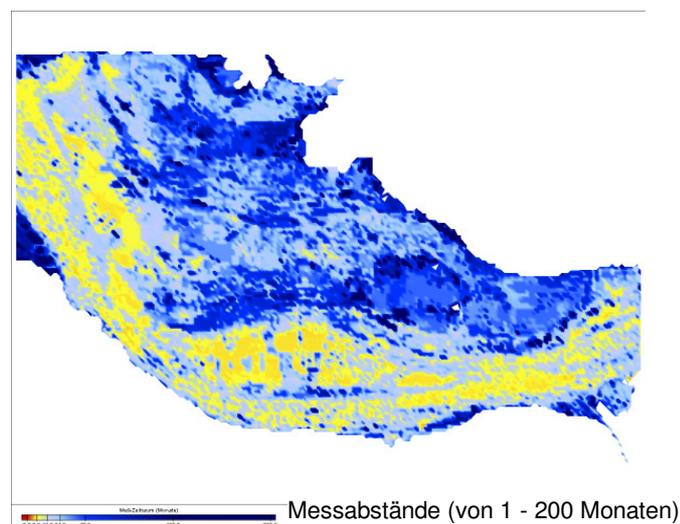
Erosionsraten, also die Entwicklung der zeitlichen Ableitungen  $dz/dt$ , abgeleitet werden. Die Diskrete-Fourier-Transformation wurde in einem zweiten Schritt auf die Zeitreihe der zeitlichen Ableitungen  $dz/dt$  angewendet. Die hierbei entstehenden Frequenzspektren weisen wesentlich stärkere Strukturen auf (siehe Abbildung 81)



**Abbildung 81** Tiefenänderung  $dz/dt$  über die Zeit und Frequenzspektrum

So lassen sich im Spektrum beispielsweise jährliche und halbjährliche „Frequenzspitzen“ erkennen. Die hieraus abgeleiteten maximalen Vermessungsintervalle sind in Abbildung 82 dargestellt.

Die Zeitreihenauswertung der Erosions- und Sedimentationsraten  $dz/dt$  stellen einen guten Indikator für die Festlegung von Messintervallen dar. Für den Bereich der Medemrinne im Elbeästuar ergeben sich Messintervalle von 6 Monaten in den aktiven Rinnen und alle 2 Jahre auf den Watten.



**Abbildung 82** Maximale Vermessungsintervalle in Monaten im Bereich der Medemrinne

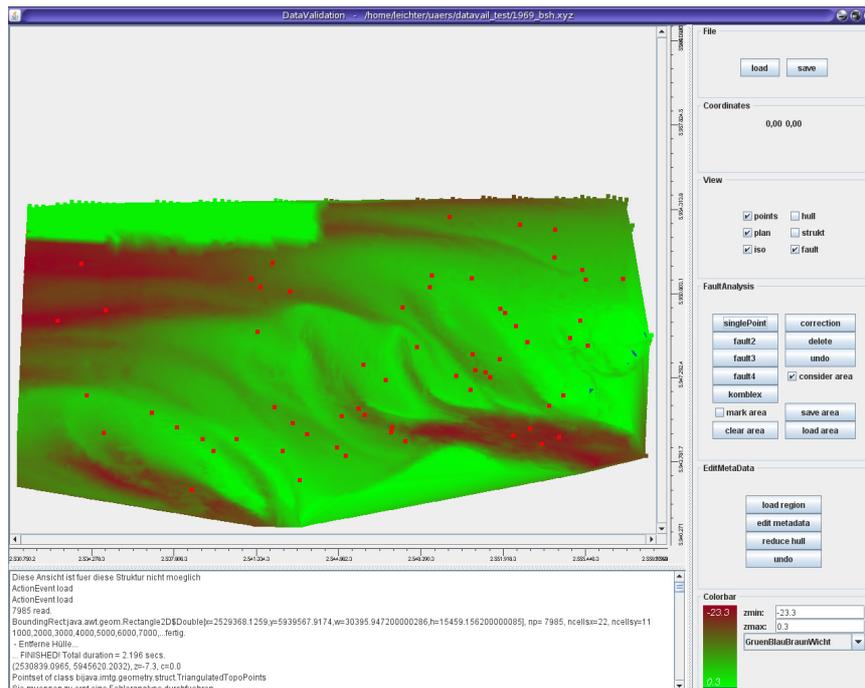
Weitere Verfeinerungen können durch die Berücksichtigung der morphologischen Geschwindigkeiten erreicht werden.

Die Berechnungen der minimalen und maximalen Messintervalle basieren auf den zur Verfügung stehenden Vermessungsdaten. Wurde beispielsweise zu selten

gemessen, um die natürlichen Gestaltungsvorgänge abbilden zu können, weist auch die Bestimmung der Messintervalle zu große Zeiträume aus. Das Problem kann wiederum durch eine enge Verknüpfung von prozess- und daten-basierten morphodynamischen Modellen behoben werden. So können auch numerische Simulationen über die mögliche zeitliche Varianz der Tiefenentwicklung Auskunft geben und bei der Bestimmung der Messintervalle herangezogen werden.

## 10 Workflow und Anwendungstools

Im Verlauf des Projektes sind ein Workflow und diesen unterstützende Softwareprototypen entwickelt worden. Eine ausführliche Funktionsbeschreibung kann dem Modulhandbuch [27] entnommen werden. Neben der Entwicklung verschiedener Filter für die eigentlichen Vermessungsdaten wurden Verfahren implementiert, die projektspezifische Metadaten semiautomatisch generieren. Zur Validierung, Fehleridentifikation und Korrektur als auch zur manuellen Vervollständigung der Metadaten wurde das Modul **DataValidation** implementiert.



**Abbildung 83** DadaValidation mit markierten fehlerhaften Vermessungen

Im Ergebnis dieses Prozesses entstehen Datenpakete, bestehend aus den Vermessungsdaten, Nokis-Metadaten und projektspezifischen Metadaten, die dann in die raum-zeit-digitale Bathymetrie importiert werden können. Für die eigentliche, mit validierten Vermessungsdaten gefüllte digitale Bathymetrie wurden unterschiedliche, den Ingenieuransforderungen gerechte, Sichten implementiert. Für eine Übersicht über alle in der digitalen Bathymetrie archivierten Vermessungen als auch zum Hinzufügen und Löschen von Vermessungen, kann das Modul **MetaView** verwendet werden.

Im Modul MetaView wurden neben der 2-dimensionalen und 3-dimensionalen Visualisierung der Metadaten weitere Auswerteverfahren implementiert, die nur auf den Metadaten operieren. Hierzu gehören beispielsweise die Anzahl von Vermessungen an einem Ort bzw. die Entwicklung der Punktdichte über die Jahre.

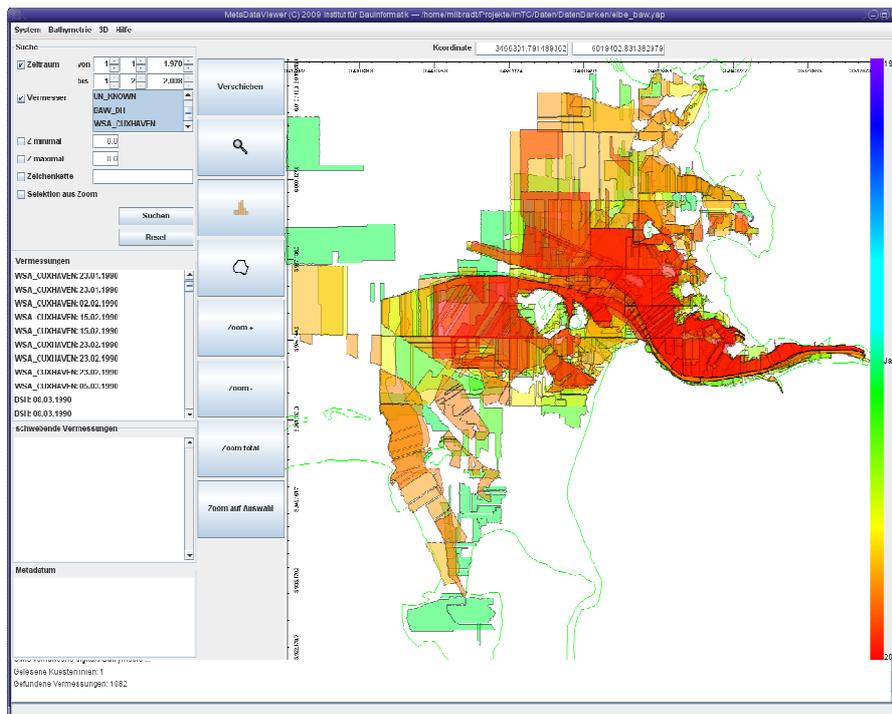


Abbildung 84 MetaView des Modells des Elbeästuars

Neben der Sicht auf die Metadaten ist es unter Umständen auch hilfreich, die eigentlichen Vermessungsdaten in Verbindung mit den Metadaten zu visualisieren, wofür das Modul **DataView** entwickelt wurde. Bei der Darstellung der Vermessungsdaten muss jedoch die Mächtigkeit der darzustellenden Daten berücksichtigt werden, die ganz wesentlich die Geschwindigkeit der Darstellung beeinflussen.

Der **BathymetrieSimulator** erlaubt unter anderem die Ableitung quasisynoptischer Bathymetrien zu einem festgelegten Zeitpunkt. Diese werden auf vorgegebene Strukturen (Raster, Netze, usw.) übertragen. Zusätzlich bietet der BathymetrieSimulator die Möglichkeit, gerasterter Funktionen der Tiefenentwicklung zu exportieren, wodurch eine wesentliche Reduktion der Daten erreicht wird. Diese Funktionen erlauben im Modul ExtendedAnalyse eine interaktive Auswertung in Raum und Zeit.

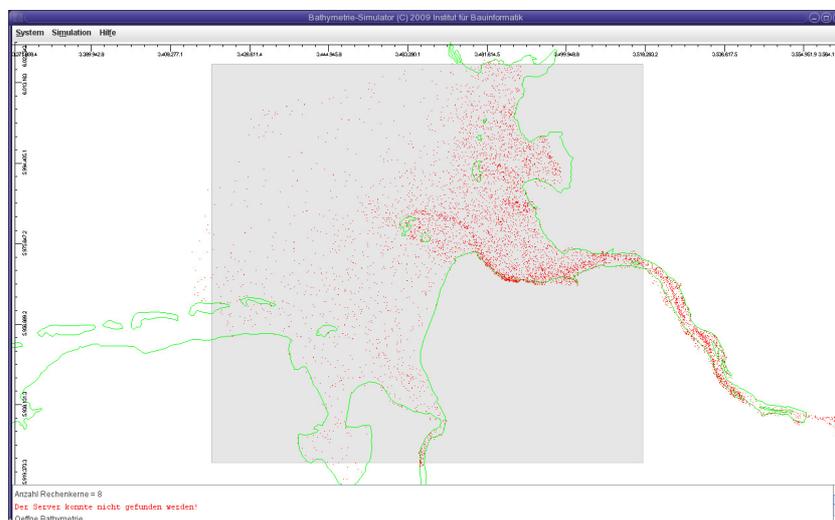
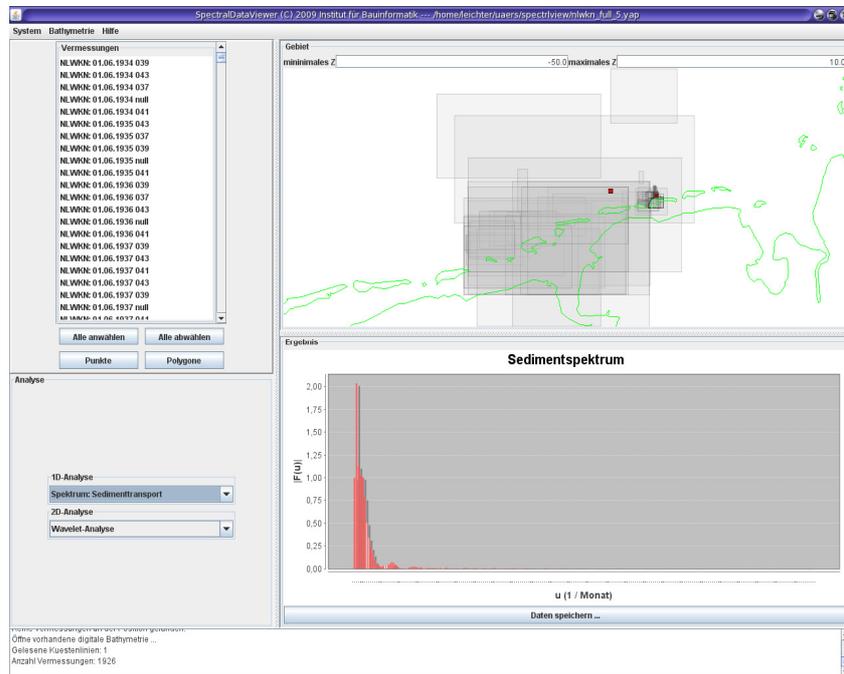


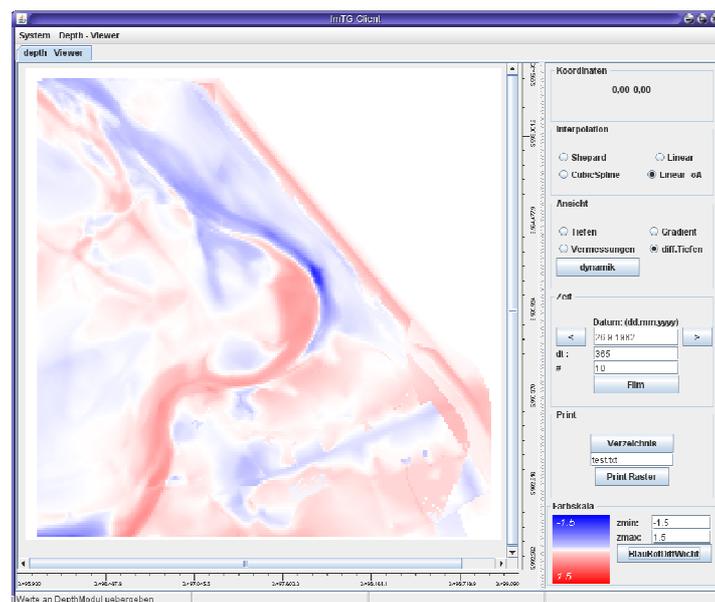
Abbildung 85 BathymetrieSimulator mit einer Menge von Referenzpunkten

Wesentlich komplexere Analysen über Spektren der Tiefenentwicklung bzw. der Zeitreihen der Sedimentations- und Erosionsraten lassen sich im Modul **DataSpectralView** durchführen. Hierzu gehört unter anderem auch das Ableiten der unteren und oberen Grenzen der Messhäufigkeiten.



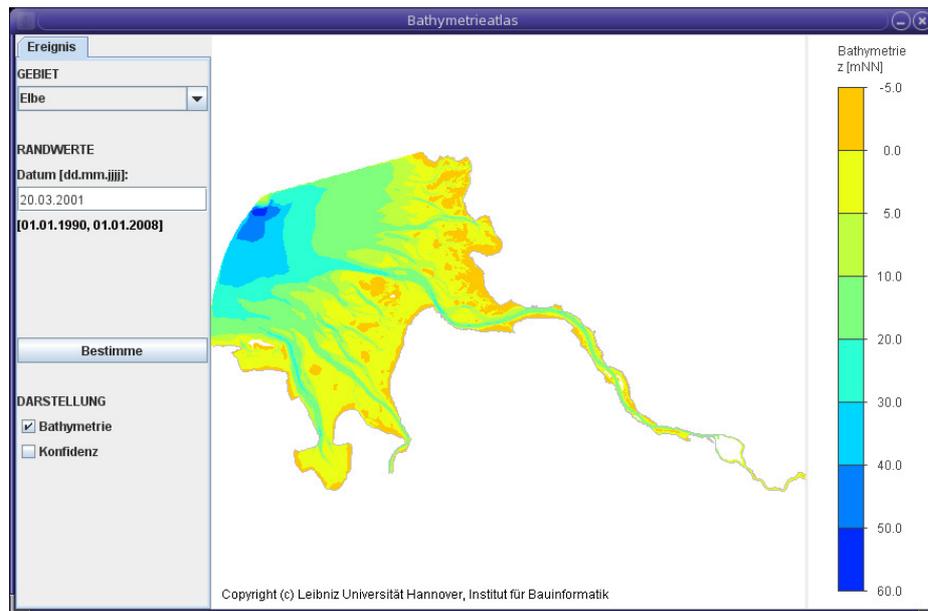
**Abbildung 86** DataSpectralView mit dem Spectrum der Erosions- und Sedimentationsraten

Sollen bathymetrische Entwicklungen interaktiv untersucht werden, so eignet sich die vollständige datenbankbasierte digitale Bathymetrie in der Regel nicht. Hierfür wurde ein geeignetes Datenformat und das Modul **ExtendedAnalysis** entwickelt. Dieses Modul visualisiert die interpolierten Tiefen, ermöglicht die interaktive Änderung der zeitlichen Interpolationsmethoden, die Darstellung entlang von Schnitten sowie die Animation der zeitlichen Entwicklung innerhalb der zuvor exportierten Region.



**Abbildung 87** ExtendedAnalysis mit Animation der Sedimentations- und Erosionsraten

Zusätzlich wurde ein **Web-Portal** implementiert, bei dem für die unterschiedlichen Projektgebiete typische Ingenieurvisualisierungen bereitgestellt werden.



**Abbildung 88** Webportal mit Darstellung der quasikonsistenten Bathymetrie

Der entwickelte Workflow und die implementierten Prototypen wurden durch Workshops bei den Projektpartnern eingeführt und haben zu einer stetigen Weiterentwicklung geführt.

## 11 Projektpräsentationen

Das Projekt wurde beim KFKI-Kolloquium 2008 in Bremerhaven, auf der HEIC 2009 in Chile, mit einem Beitrag im KFKI-Aktuell 2008-1 sowie im Rahmen des Doktorandenseminars der Fakultät Bauingenieurwesen und Geodäsie der Leibniz Universität Hannover präsentiert.

## 12 Relevante Ergebnisse Dritter

Der enge Kontakt mit den Projektpartnern und mit Fachleuten aus den Wasser- und Schifffahrtsverwaltungen hat zu einem intensiven Austausch auf fachlicher Ebene geführt. Im Rahmen dieser Gespräche war ein großes Interesse an den Fragestellungen des Projektes zu spüren. Die Modellvorstellung raumzeitlicher digitaler Bathymetrien verbreitet sich sowohl national als auch international. Es sind jedoch noch keine größeren internationalen Forschungsaktivitäten zu beobachten, deren Ergebnisse für die Durchführung des Projekts von Bedeutung sind.

Zum Ende der Projektlaufzeit hat Frau Anna Zorndt eine Diplomarbeit [23] beim Franzius-Institut der Leibniz Universität Hannover zum Thema „Einfluss hydrodynamischer Randbedingungen auf die Mobilität von Transportkörpern in der Tideelbe bei Hamburg“ geschrieben. In der Diplomarbeit ging es unter anderem um die Bestimmung der Geschwindigkeit des Wanderns von Dünen in der Elbe. Mit Frau Zorndt gab es während der Diplomarbeitszeit einen regen Gedankenaustausch.

## 13 Zusammenfassung und Ausblick

Das Projekt ImTG ist mit dem Ziel gestartet, ausgehend von digitalen Bathymetrien in Raum und Zeit, Methoden zu entwickeln, die zu einer Verbesserung der Kenntnisse der morphodynamischen Veränderungen an der deutschen Nord- und Ostseeküste beitragen. Hierzu wurden Projektgebiete festgelegt und die für diese relevanten Vermessungsdaten zusammengetragen, validiert und eventuell korrigiert. Mit dem Aufbau der projektgebietsbezogenen datenbankbasierten digitalen Bathymetrien stand die Basis zur Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten zur Verfügung. Zum Ende der Projektlaufzeit sind in einem intensiven Diskussionsprozess mit den Projektpartnern ein praxistauglicher Workflow und diesen unterstützende Softwareprototypen entwickelt worden. Den Projektpartnern konnten mit den Prototypen Werkzeuge zur eigenen Weiterverwendung zur Verfügung gestellt werden. Eine besondere Herausforderung wird es nach Projektende sein, diese Prototypen weiter zu pflegen und an die sich ändernden Anforderungen anzupassen.

Zu den wesentlichen wissenschaftlichen Ergebnissen des Projektes gehört die Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung der morphologischen Geschwindigkeiten als auch zur Bestimmung resultierender Sedimenttransporte auf der Basis von Vermessungsdaten. Insbesondere bei der Bestimmung der Sedimenttransportraten,

die eine beobachtete Tiefenänderung erzeugt, hat sich die Notwendigkeit einer engen Verzahnung von prozessbasierten und datenbasierten morphodynamischen Modellen ergeben. Der Verbindung dieser beiden Modellansätze sollte in Zukunft vermehrt Aufmerksamkeit geschenkt werden. Für die Optimierung von Messkonzepten konnten Indikatoren für obere und untere Schranken der Messhäufigkeiten entwickelt und in den Prototypen implementiert werden.

Für die Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit der abgeleiteten quasi-synoptischen Bathymetrien, morphologischen Geschwindigkeiten, Messintervalle usw. wurden im Projekt neben den klassischen Betrachtungen die Möglichkeiten einer durchgängigen Formulierung auf der Basis von Fuzzyzahlen angedacht. Dieser Ansatz erscheint vielversprechend, muss jedoch in Zukunft noch vertieft untersucht werden.

Die im Projekt entwickelten Methoden und Verfahren lassen sich auf weitere zu beobachtende physikalische und ökologische Größen übertragen. Hier ist insbesondere der Aufbau einer raum- und zeitvarianten Küstensedimentologie zu nennen. Bei einer solchen Küstensedimentologie ist die Modellierung von Mehrkornsedimentsystemen eine besondere Herausforderung.

## 14 Glossar

ImTG	Projekt zur Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten im Küstennahbereich
ALR	Amt für ländliche Räume, heute LKN-SH
LKN-SH	Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein früher ALR
StAUN	Staatliches Amt für Umwelt und Natur
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
BAW-DH	Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg
KoDiBa	Projekt zur Entwicklung und Implementierung von Methoden zur Aufbereitung konsistenter digitaler Bathymetrien
ODBS	Objektorientiertes Datenbanksystem
KML	Keyhole Markup Language
NOKIS	Metadaten-Informationssystem für die Küstenforschung und das Küsteningenieurwesen
WSA	Wasser- und Schifffahrtsamt
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
HPA	Hamburg Port Authority

## 15 Literaturverzeichnis

- [1] Römer P., Visengeriyeva L., db4o schnell + kompakt, entwickler.press, 2007
- [2] Paterson J., Edlich S. u.a., The Definitive Guide to db4o, Apress, 2006
- [3] Rase W.D., Visualisierung von Planungsinformationen, Heft 89, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 1998
- [4] Berkhahn V., Geometrische Modellierung in der Bauinformatik, Shaker Verlag, 2005
- [5] Milbradt P., Sellerhoff F., Krönert N., KoDiBa Abschlussbericht, 2005
- [6] Bronstein, Semendjajew., Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt/Main
- [7] H. Samet, Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures, 2006
- [8] [http://de.wikipedia.org/wiki/Keyhole\\_Markup\\_Language](http://de.wikipedia.org/wiki/Keyhole_Markup_Language)
- [9] <http://code.google.com/apis/kml/documentation/index.html>
- [10] [http://de.wikipedia.org/wiki/Geography\\_Markup\\_Language](http://de.wikipedia.org/wiki/Geography_Markup_Language)
- [11] <http://www.opengeospatial.org/standards/gml>
- [12] [www.db4o.com](http://www.db4o.com)
- [13] [http://de.wikipedia.org/wiki/Hauptseite – verschiedene Seiten](http://de.wikipedia.org/wiki/Hauptseite_-_verschiedene_Seiten)
- [14] [http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web\\_ph11/umwelt-technik/12ultraschall/u\\_s\\_echolot.htm](http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph11/umwelt-technik/12ultraschall/u_s_echolot.htm)
- [15] <http://www.wsa-hamburg.wsv.de/Wasserstrassen/Peilwesen/Messsysteme/-index.html>
- [16] [http://www.braunschweig.de/rat\\_verwaltung/verwaltung/fb61\\_2/laserscan.html](http://www.braunschweig.de/rat_verwaltung/verwaltung/fb61_2/laserscan.html)
- [17] [http://www.wsv.de/wsa-bhv/bau\\_und\\_unterhaltung/seevermessung/index.html](http://www.wsv.de/wsa-bhv/bau_und_unterhaltung/seevermessung/index.html)
- [18] [http://www.nlwkn.niedersachsen.de/master/C6172578\\_N5743389\\_L20\\_D0\\_I5231158.html](http://www.nlwkn.niedersachsen.de/master/C6172578_N5743389_L20_D0_I5231158.html)
- [19] Florian Ladage, Morphologische Entwicklung um Langeoog im Hinblick auf die verstärkten Dünenabbrüche vor dem Pirolatal, NLÖ -Forschungstelle Küste-, 2002
- [20] Florian Ladage, Morphologische Entwicklung im Bereich Juist / Memmert, Abschlussbericht, NLÖ -Forschungstelle Küste-, 2001
- [21] [http://www.schleswig-holstein.de/ALR/DE/Kuestenschutz/Aufgaben/Kuestengewasserkunde/Kuestengewasserkunde\\_\\_node.html\\_\\_nnn=true](http://www.schleswig-holstein.de/ALR/DE/Kuestenschutz/Aufgaben/Kuestengewasserkunde/Kuestengewasserkunde__node.html__nnn=true)
- [22] Rolf Klein, Algorithmische Geometrie, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005

- [23] Anna Zorndt, Einfluss hydrodynamischer Randbedingungen auf die Mobilität von Transportkörpern in der Tideelbe bei Hamburg, Diplomarbeit am Franzius-Institut der Leibniz Universität Hannover, 2009
- [24] H. Hanss: Applied Fuzzy Arithmetic – An Introduction with Engineering Applications. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2005
- [25] Milbradt, P., Abu Abed, W.; Understanding the Aspect of Fuzziness in Interpolation Methods; Proceedings of 18th IKM, Weimar, ISSN 1611-4086, 2009
- [26] Berthold, T., Milbradt, P.; Artificial Neuronal Networks in Environmental Engineering: Theory and Applications; Proceedings of 18th IKM, Weimar, ISSN 1611-4086, 2009
- [27] C. Asche, P. Milbradt, Modulhandbuch – Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten im Küstennahbereich, Institut für Bauinformatik der Leibniz Universität Hannover, 2009
- [28] H. Wirth, Flächenhafte Plausibilisierung von Peildaten, Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz, Koblenz, 1999
- [29] A. Zell, Simulation neuronaler Netze, vol.1, Addison-Wesley Verlag, Bonn, 1994
- [30] W. Kinnebrock, Neuronale Netze: Grundlagen, Anwendungen, Beispiele, Oldenbourg, 1992
- [31] R. Weidlich, Strukturerkennung in bathymetrischen Daten, Projektarbeit am Institut für Bauinformatik der Leibniz Universität Hannover, 2008
- [32] P. Milbradt, C. Dorow, Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten im Küstennahbereich, 3. Zwischenbericht, Institut für Bauinformatik der Leibniz Universität Hannover, 2007
- [33] A.V. Oppenheim, R.W. Schäfer, Zeitdiskrete Signalverarbeitung, München, 2004
- [34] W. Abu Abed, P. Milbradt, Analysis of Morphodynamics in Coastal Zones using Spatial-Temporal Fuzzy Interpolations, Proceedings of the First International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering, Funchal - Madeira - Portugal, 1-4 September 2009, ISBN 978-1-905088-34-8
- [35] P. Milbradt, C. Dorow, Identification of Morphological Tendencies and Velocities in Coastal Zones, Science and Information Technologies for Sustainable Management of Aquatic Ecosystems, Proceedings of HEIC 2009, Conception, ISBN 978-981-08-2099-2, 2009
- [36] W. Abu Abed, Fuzzy-Arithmetik zur Behandlung der Unschärfe in der Umweltinformatik, Forum Bauinformatik 2008, Junge Wissenschaftler forschen, Tagungsband, Institut für Bauinformatik, Fakultät Bauingenieurwesen, TU Dresden, 2008
- [37] T. Berthold, M. Höcker, T. Schonert, Neuronale Netze zur Approximation von Geländeoberflächen, Forum Bauinformatik - Junge Wissenschaftler forschen, Graz 2007

[38] Matthias Bode, Wassim Abu Abed, Entwurf eines Frameworks zur Visualisierung unscharfer Daten, Forum Bauinformatik 2009, Universitätsverlag Karlsruhe 2009 ISBN 978-3-86644-396-9

[39] Christian Asche, Wavelet-basierte Kompression von bathymetrischen Geländedaten, Forum Bauinformatik 2009, Universitätsverlag Karlsruhe 2009 ISBN 978-3-86644-396-9

[40] C. Dorow, M. Bode, Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten im Küstennahbereich, Tagungsband des 20. Forum Bauinformatik 2008, Institut für Bauinformatik, Fakultät Bauingenieurwesen, TU Dresden 2008, ISBN: 978-3-86780-090-7

[41] P. Milbradt, C. Dorow, Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten im Küstennahbereich, KFKI-aktuell, 2. Ausgabe, 2008

[42] P. Milbradt, C. Dorow, Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten im Küstennahbereich, KFKI-aktuell, 1. Ausgabe, 2008