

Numerische Simulation der Morphogenese von Windwatten

Von RAINER LEHFELDT und VOLKER BARTHEL

Zusammenfassung

Die Simulation von hydrodynamischen und morphodynamischen Prozessen insbesondere im Küstenbereich wird in zunehmendem Maße mit numerischen Modellen durchgeführt. In einer Weiterentwicklung der bewährten hydrodynamischen Vorhersagewerkzeuge werden im morphodynamischen Modell durch Einbeziehung der Sedimenttransportgleichungen Wasserstände, Strömungen und Wellen über einer kontinuierlich aktualisierten Topographie berechnet. Auch wegen des ungleich höheren Rechenaufwandes besteht hier noch ein Forschungsbedarf. In dem vom KFKI geförderten Projekt MorWin werden bestehende morphodynamische Simulationssysteme am Beispiel der Windwatten an der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns eingesetzt und weiterentwickelt.

Da die Erstellung und das Betreiben von morphodynamischen Modellen das Zusammenwirken von mehreren Disziplinen erfordern, wird eine dezentrale Projektbearbeitung mit Zusammenführung und Kooperation beteiligter Experten durch moderne Kommunikationstechnologie auf der Basis des INTERNET im Projekt getestet. Im **virtuellen Institut MorWin** sind Institute dreier Universitäten und die beteiligten Behörden vernetzt und haben Zugriff auf Daten, Tools und Ergebnisse der Rechenläufe.

Die Ergebnisse werden für die Planung von Küstenschutzmaßnahmen (großräumig) sowie für die Erstellung von Bagger- und Strombaustrategien im Rahmen der Unterhaltung der Nordzufahrt nach Stralsund benötigt.

Die erste Phase des Projekts, über die hier berichtet wird, ist nach zwei Jahren Laufzeit weitgehend abgeschlossen. Dabei wurden neben einer umfassenden Sammlung und Auswertung von Natur- und Modelldaten auch numerische Tools weiterentwickelt und verifiziert sowie die Grundlagen für das virtuelle Institut erarbeitet. Weitergehende Entwicklungen sowie insbesondere die Definition von morphodynamisch wirksamen Szenarien und praktische Anwendungen werden Gegenstand der zweiten Phase sein.

Summary

The simulation of hydrodynamic and morphodynamic coastal and estuarine processes with numerical models has become an important feature of coastal engineering practice. In a more recent development, the inclusion of sediment transport formulae into the hydrodynamic simulation and the continuous updating of the bathymetry has made the morphodynamic model an even more powerful tool for prognostic purposes. However, there is still a need for research, not only because of the computational needs for such numerical tools. Based on financial support by the Ministry for Research and Technology through the German Coastal Engineering Research Council (GCERC/KFKI) the project MorWin will verify and further develop existing morphodynamic codes which will be applied to the evolution of wind-generated flats in the Baltic sea at the coast of Mecklenburg-Vorpommern.

The development and operation of morphodynamic models require the cooperation of experts of various disciplines. Commonly, these experts are not located in the same place and have to be joined using means of modern communication technology based on the INTERNET. The virtual institute MorWin encompasses and actively connects scientists and engineers from 3 university institutes and the involved governmental bodies. Everybody has access to and control of data, simulation tools, results of model runs and pre- and post-processing software.

The results of the project, simulation tools and virtual cooperation, are needed for planning and design processes in coastal protection (wide area) as well as for dredging strategy and training measures for the access channel to the Port of Stralsund.

The first phase of the project, described in the following, has almost been completed after two years. Together with comprehensive data mining and assessment numerical tools have been developed and verified. The framework of the virtual institute was established. Further development together with the definition of scenarios of significant morphodynamic activity and practical applications of the tools will be the main issues of phase II.

Inhalt

1. Untersuchungsgebiet und Morphodynamik	258
1.1 Hydro- und morphodynamische Prozesse	258
1.2 Windwatten	260
2. Projektarbeitsumgebung	264
2.1 Stand der Modelltechnik	264
2.2 Virtuelles Institut MorWin	265
2.2.1 Organisation	266
2.2.2 Arbeitsweise	267
2.2.3 Technologiehintergrund	267
3. Modellanwendung	268
3.1 Eingesetzte Modelle	268
3.2 Informationsbasis	270
3.3 Erste Ergebnisse	273
4. Zusammenfassung und Ausblick	274
5. Danksagung	275
6. Schriftenverzeichnis	275

1. Untersuchungsgebiet und Morphodynamik

Die weitgehend tidefreien Küsten der Ostsee unterliegen Verformungen, die von Windwellen, winderzeugten Strömungen sowie Wasserstandsschwankungen und deren Sekundärströmungen hervorgerufen werden. In dieser dynamischen Umgebung müssen die Zufahrten zu den Häfen, die als tiefe Rinnen in den Küstensaum einschneiden, auf Tiefe gehalten werden. Darüber hinaus gilt es im Rahmen von Küstenschutzmaßnahmen Abbruchbereiche zu erkennen, zu sichern und langfristig das Transportgeschehen so zu beeinflussen, daß der Schutz von Menschen und Objekten im Küstenraum gewährleistet ist.

1.1 Hydro- und morphodynamische Prozesse

Das Küstengebiet der Ostsee im Bereich der Gellenbucht umfaßt das in Abb. 1 dargestellte Untersuchungsgebiet und ist gekennzeichnet durch feine bis mittelfeine Sande [21], die sich unter den angreifenden Kräften ständig umlagern.

Die Vorgänge, die sich bei Auflaufen der winderzeugten Wellen in flaches Wasser, beim Brechen und Rückströmen und bei den Wechselwirkungen mit der Topographie abspielen, sind komplex und noch nicht vollständig erforscht. Es ist jedoch allgemein bekannt, daß je nach Anlaufrichtung der Wellen eine Küstenlängsströmung entsteht, die eine ständige Verlagerung von Sediment bewirkt. Dieser küstenparallele Längstransport führt je nach Intensität der Seegangseinwirkung in einigen Bereichen zu Erosion und schließlich Küstenabbruch; in anderen Gebieten, die vor Seegangswirkung besser geschützt sind, erfolgt eine Akkumulation des transportierten Materials.

Überlagert wird die seegangsinduzierte Strömung durch kurz- und längerfristige Was-

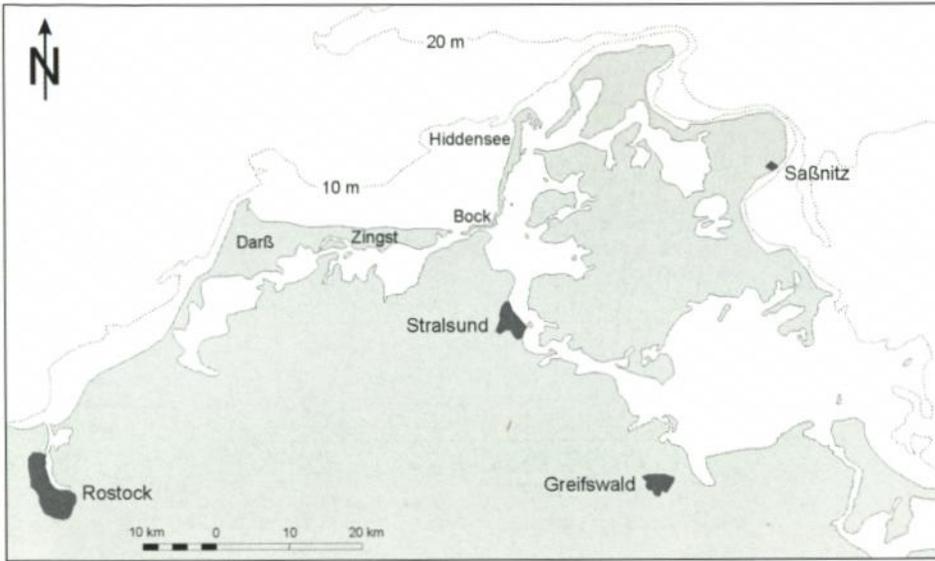


Abb. 1: Übersichtsplan Deutsche Ostseeküste mit Untersuchungsgebiet

serstandsänderungen, die durch die Tideerscheinung in der Nordsee und Windstau in der Ostsee angeregt werden. Die sogenannten ‚Schwappeneffekte‘ kommen mit Perioden von 1 Stunde (in Buchten und Förden) bis zu 47 Stunden in der gesamten Ostsee in NO-SW-Richtung vor. Wasserstandsänderungen von bis zu 3 m in wenigen Stunden führen einmal zur Verschiebung der Wellenangriffshorizonte auf das Sediment und damit zu Abbrüchen auch an den Steilufern, aber auch zu Strömungen, die an den Materialumlagerungen nicht unerheblich beteiligt sein können. Abb. 2 zeigt kurzfristige Wasserstandsänderungen am Pegel Warnemünde.

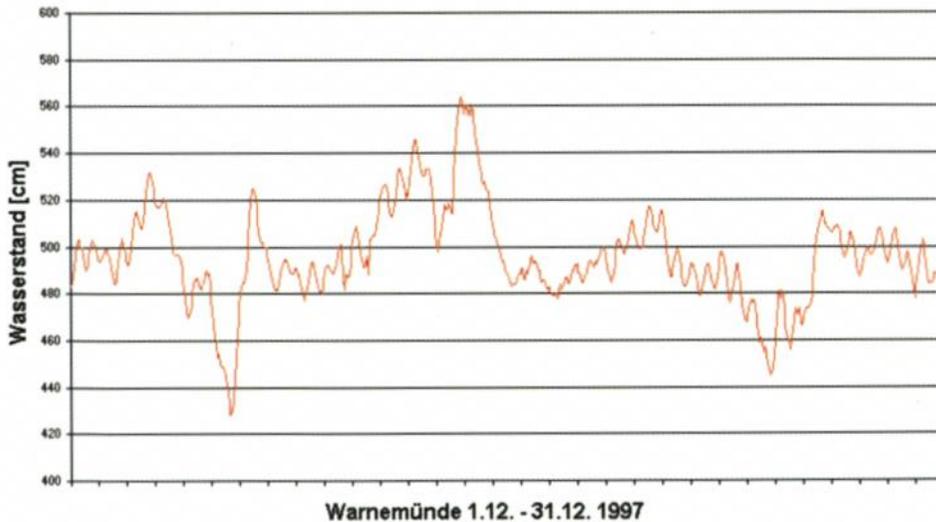


Abb. 2: Wasserstandsänderungen am Pegel Warnemünde, Dezember 1997

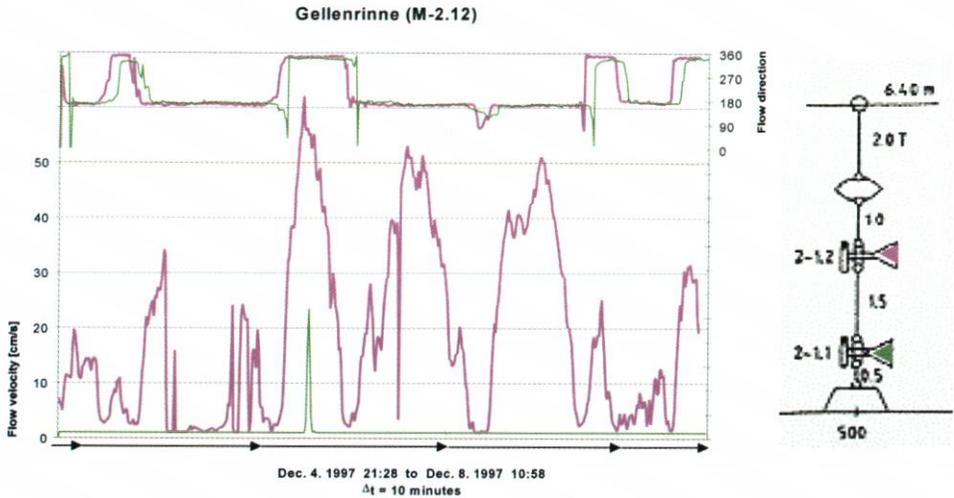


Abb. 3: Dauerstrommessungen in der Gellenrinne, Dezember 1997

Die mit der Änderung der Wasserstände einhergehenden Strömungen sind durch die Ergebnisse von Dauerstrommessungen in der Gellenrinne im Dezember 1997 in Abb. 3 gekennzeichnet. Die Messungen zeigen, daß die Strömung innerhalb einer Stunde über die gesamte Wassersäule kentert und Spitzengeschwindigkeiten vom 50–60 cm s^{-1} erreicht werden.

Der Vollständigkeit halber seien hier noch der Sandtransport durch Wind (äolischer Transport) und die vom Eis bewegten Sedimente genannt. Der Anteil am Gesamttransport ist jedoch gering und wird hier nicht betrachtet.

1.2 Windwatten

Das Untersuchungsgebiet zeichnet sich mit den Boddenketten durch eine besondere Konfiguration der Grenzen aus, die zu den noch näher zu beschreibenden Erscheinungen führt (Abb. 4). An der Zingster Außenküste erzeugen westliche und nordwestliche Winde einen Materialtransport, der in östlicher Richtung verläuft. Bei Erreichen der Insel Hiddensee, die vornehmlich in nord-südlicher Richtung orientiert ist, wird der Küstenlängstransport einmal durch die Gellenrinne unterbrochen, die einen Teil des Sediments aufnimmt und je nach Strömungsrichtung in den Seebereich vor Hiddensee oder in Richtung Stralsund in die Barhöfter Rinne transportiert. Zur gleichen Zeit werden bei Nord- bis WNW-Winden Materialströme angeregt, die sich in Richtung Süden längs der Küste der Insel Hiddensee bewegen und am südlichen Ende auf die Akkumulation des West-Ost-Transportes treffen. Diese Akkumulation zeigt sich in großen Sandablagerungen, die hier als Windwatten bezeichnet werden, deren Oberfläche bei etwa NN + 30 cm liegt und die je nach Wasserstand freiliegen oder aber um 10–50 cm überstaut sind. Auf diesen Flächen wird Material vorwiegend durch winderzeugte Wellen bewegt. Nur an den Rändern vollzieht sich auch ein strömungsabhängiger Transport.

Diese Dynamik des Windwatts „Bock“ wird schon durch eine Untersuchung von REINHARD (1953) beschrieben, der in einer Prinzipskizze (Abb. 5) die Vorgänge im Bereich

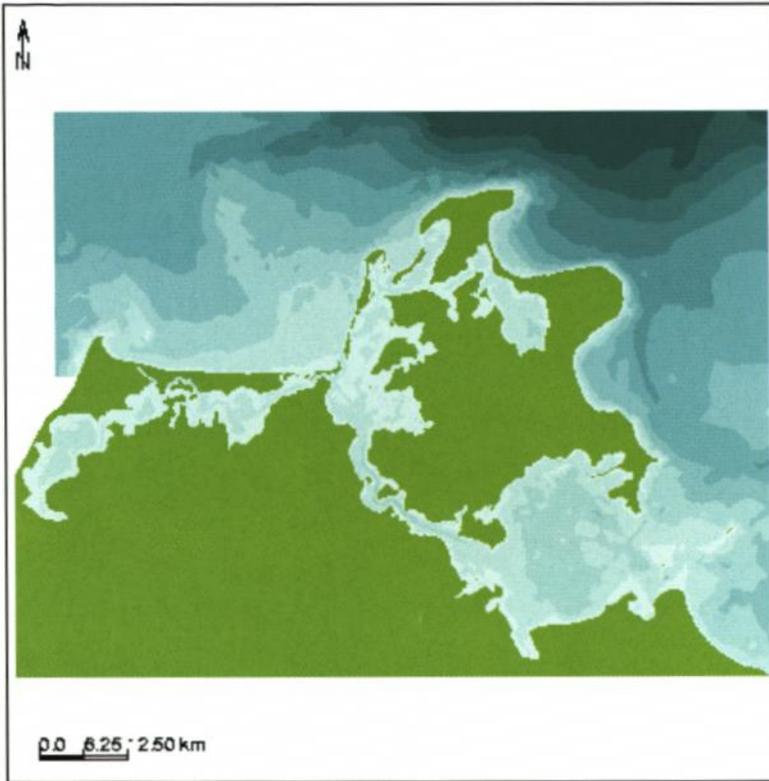


Abb. 4: Untersuchungsgebiet Gellenbucht, Darß-Zingster Boddenkette, Westrügische Boddenkette, Strelasand und Greifswalder Bodden

des Gellenstroms darstellt. Er skizziert die Transportbänder der wandernden Sande innerhalb der Sandriffsysteme entlang der Küste und den nach Süden geführten Materialstrom, der zum Aufbau des Rückstromdeltas am Geller Haken beiträgt. Bei Hochwasser verläuft bei Pramort ein Teil dieser Ströme auch direkt über die Sandflächen in die Boddengewässer. Zusätzlich eingetragen sind Transportwege auf dem Ostteil des Bock vor der Aufspülung.

Die verfügbaren Unterlagen zur morphodynamischen Entwicklung der Stromrinnenverläufe sowie der Sandbänke, den Windwatten, weisen den gesamten Küstenabschnitt als morphodynamisch sehr aktive Zone aus. Neben dem seegangsinduzierten Küstenlängstransport von Sediment und sturmhochwasserbedingten Umlagerungen prägen jedoch auch kontinuierliche Unterhaltungsbaggermaßnahmen in den Fahrrinnen die Prozesse, die in ihrer Wechselwirkung die Küstenentwicklung beeinflussen.

Anhand von Seekarten kann die morphologische Entwicklung des Nordfahrwassers seit 1879 verfolgt werden. Die Abb. 6 zeigt dazu zwei Zustände in den Jahren 1879 und 1986. Die heutigen Stromrinnenverläufe des Gellenstroms und der Barhöfter Rinne sind sehr ähnlich zu den vor 100 Jahren bestandenen Verhältnissen. Aus Sicherheitsgründen waren 1915 hier die Fahrrinnen nach Richtfeuerachsen verlegt worden. Als die stetig notwendigen Unterhaltungsbaggerungen für eine kurze Zeitspanne von 5 Jahren eingestellt werden mußten, verlagerte sich die Fahrrinne wieder um ca. 200 m nach Süden bzw. Osten.

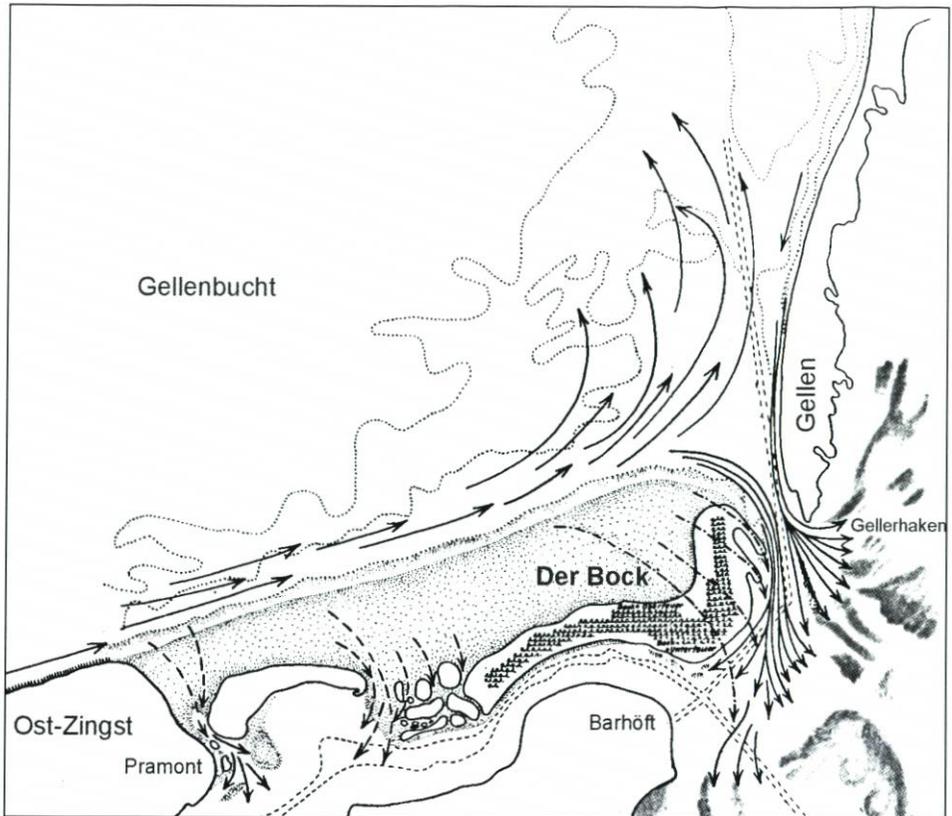


Abb. 5: Prinzipskizze zum Materialtransport im Inneren der Gellenbucht nach REINHARD Tafel 6

Zur Optimierung von Trassierung und Unterhaltungsmaßnahmen (Baggerinsatz, Strombauwerke) im Fahrrinnensystem der Nordansteuerung Stralsund gibt es derzeit wenig Entscheidungsgrundlagen. Eine quantitative Abschätzung der Vorgänge im Gesamtsystem liegt bisher nicht vor. Einzelaspekte lassen sich nach Aufzeichnungen von Baggermengen, durch Auswertung von Luftbildern oder anhand von physikalischen Modellversuchen studieren. Aussagen über die Wirkung anthropogener Eingriffe können deshalb nur auf Annahmen und Rückschlüssen auf vergangene Ereignisse beruhen.

Dies gilt insbesondere auch für den Verbleib von Baggergut. Zwischen 1906 und 1968 wurden die anfallenden Mengen auf der Sandbank Bock aufgespült. Vor allem am Nordostende erwartete man von der hochwasserfreien Ablagerung und der daraus resultierenden Verengung des Durchflußprofils eine stärkere Selbstströmung im Gellenstrom. Tatsächlich jedoch begann das System zu mäandrieren. Nach Modellversuchen der FORSCHUNGSANSTALT FÜR SCHIFFBAU (1955), deren Ergebnisse aber nicht realisiert wurden, hätte eine Verlängerung des Gellen in Form eines Sandleitdammes stabilisierende Wirkung. Derzeit wird kein Baggergut zu Strombaumaßnahmen in diesem Gebiet verwendet.

Für eine optimierte Bagger- und Strombaustrategie, in gleichem Maße jedoch auch für die Belange des Küstenschutzes und Küstenzonenmanagements, ist es erforderlich, die Dynamik der Materialbewegung in diesem Raum zu verstehen, nachzuvollziehen und Werkzeuge zu entwickeln, die eine mittel- bis langfristige Prognose ermöglichen. Diese Werk-

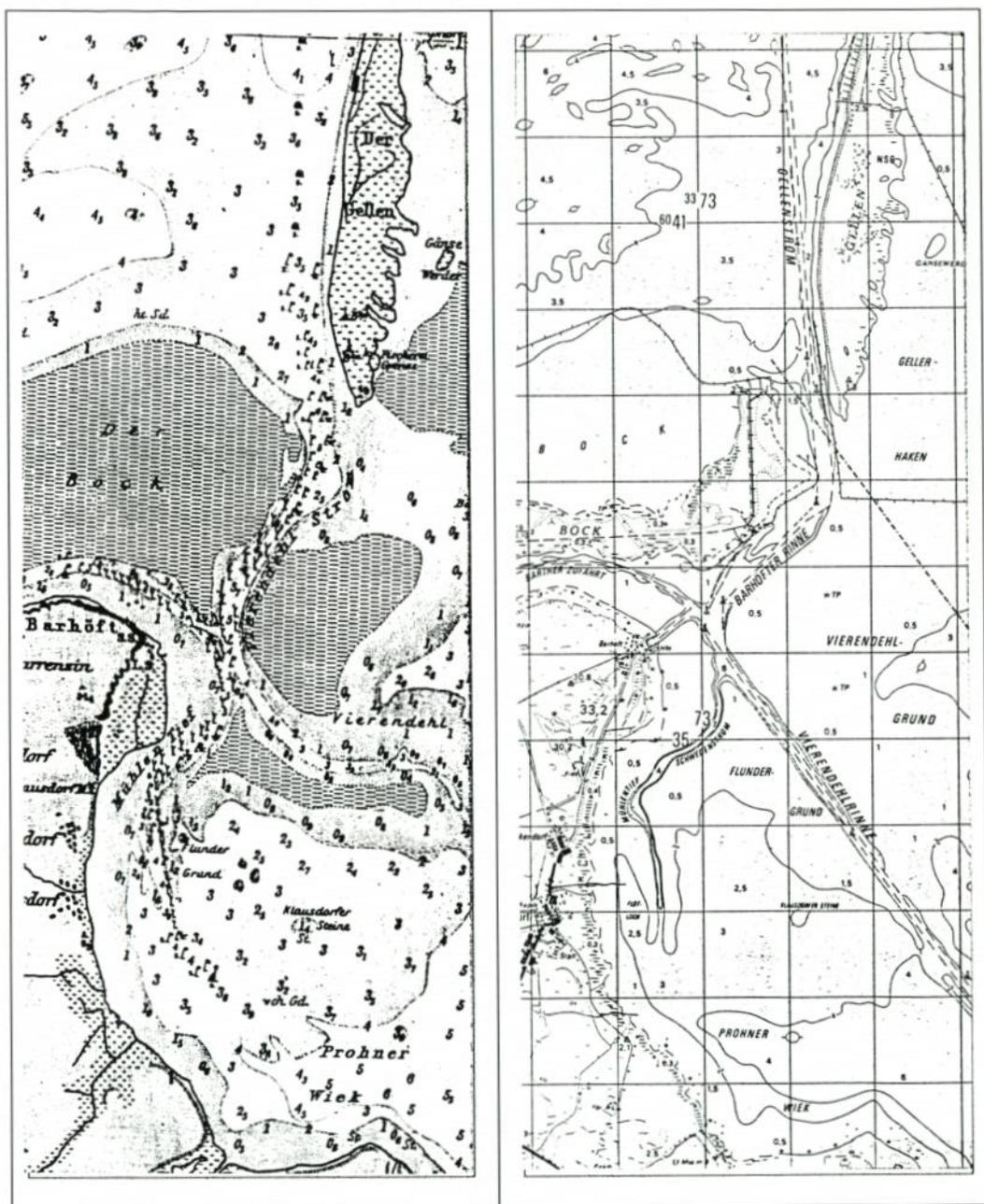


Abb. 6: Nordfahrwasser Stralsund, 1879 und 1986

zeuge, in der Form morphodynamischer Modelle, sollen auf der Basis vorhandener und noch zu ermittelnder Naturmeßdaten getestet, weiterentwickelt und auch mit bestehenden kommerziellen Simulationssystemen verglichen werden.

2. Projektarbeitsumgebung

2.1 Stand der Modelltechnik

Der Schritt vom hydro-numerischen Modell zum morphodynamischen Modell ist vergleichbar mit einem Schritt in der physikalischen Modelltechnik, der in den 60iger Jahren mit wechselndem Erfolg gemacht wurde. Nachdem ursprünglich physikalische Modelle mit fester Sohle durch die reine Feststellung der Strömungs- und Wasserstandsverhältnisse dazu benutzt wurden, die Wirkung von Einbauten und Vertiefungen auf die Hydrodynamik zu untersuchen und von dort aus auf die topographischen Änderungen zu schließen, fand die bewegliche Sohle wegen der damit verbundenen Problematik der Ähnlichkeitsgesetze für Sedimenttransport nur langsam Einzug in die Versuchsanstalten. Die naturähnliche Nachbildung von Erosion und Sedimentation in einem solchen physikalischen Modell wurde jedoch durch die rasante Entwicklung der rechnergestützten Verfahren überholt.

In den letzten Jahren sind numerische Modelle in der Küstenforschung in zunehmendem Maße eingesetzt worden. Es gelingt, hydrodynamische Prozesse (Wellen, Strömungen, Tide) mit zufriedenstellender Naturähnlichkeit zu simulieren. Durch die Einbeziehung einer Vielzahl von empirischen Transportformeln kann auch die Transportkapazität ausgewählter Bereiche für bestimmte Feststofftypen bestimmt und auf dieser Basis auf eine Änderung der Topographie bzw. Bathymetrie geschlossen werden. Dieser Prozeß wird seit geraumer Zeit durch die Entwicklung der morphodynamischen Modelle verfeinert. Ähnlich wie bei der Einführung der beweglichen Sohle in physikalischen Modellen wird die Veränderung der Sohle durch die hydrodynamischen Prozesse im ‚feed-back‘ laufend in die hydrodynamischen Rechnungen mit einbezogen. Die Simulation von Strömung und Seegang läuft daher immer über einer aktualisierten Topographie ab. Diese Einführung einer „beweglichen Sohle“ beim hydrodynamisch-numerischen Modell verbessert die Naturähnlichkeit und damit den prognostischen Wert einer numerischen Simulation erheblich. Die Prinzipskizze der Abb. 7 zeigt die grundsätzlichen Schritte einer solchen morphodynamischen Simulation.

Erste morphodynamische Anwendungen liegen als Ergebnis der von der EU geförderten **MA**rine Science and Technology – (MAST) Forschung vor. Im Projekt G8-M wurden von 35 europäischen Instituten Modellphilosophien und -techniken entwickelt, durch Naturmessungen und Laborexperimente validiert und verifiziert (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 1995). Eine Vielzahl von Veröffentlichungen demonstriert den hohen Entwicklungsstand (NICHOLSON et al., 1997), der sich auch in kommerziellen Anwendungen der letzten Jahre (PRICE et al., 1995; JOHNSON et al., 1994; DANISH HYDRAULIC INSTITUTE, 1995). Als Demonstration einer deutschen Entwicklung konnte ZANKE (1995) im Auftrag der WSD-Nord die topographische Entwicklung einer der zentralen Baggerstellen in der Tideelbe in guter Übereinstimmung mit Beobachtungsmaterial über mehrere Jahre modellieren, nachdem ein ähnliches Modell für eine ‚Nachhersage‘ der topographischen Entwicklung eines Teils der Elbmündung gute Ergebnisse zeigte. Ziel einer solchen Anwendung ist es, ein brauchbares Werkzeug für die Ermittlung der Wirkung von Einbauten, Vertiefungen und im besonderen Fall der Tideelbe für die Optimierung von Bagger- und Verklappvorgängen zu entwickeln,

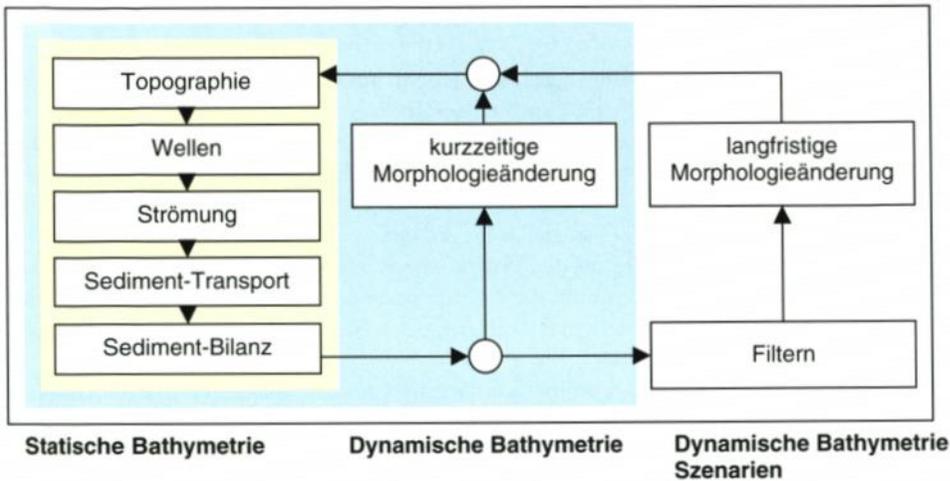


Abb. 7: Prinzip morphodynamischer Simulationen

mit dem man kurzfristig Prognosen für einen wirtschaftlich optimalen Baggereinsatz erstellen kann.

Wollte man zur Steuerung eines morphodynamischen Modells tatsächlich gelaufene oder synthetische Zeitserien von Wasserständen, Strömungen und Seegang benutzen, wäre der Rechenaufwand erheblich. Daher wird als Kernpunkt einer morphodynamischen Modellierung die Definition von Szenarien angesehen. Dies ist verhältnismäßig einfach, wenn es sich um eine Tidebewegung handelt, aus der man eine mittlere Situation herausfiltern und Extremverhältnisse kurzfristig einfließen lassen kann. Dazu gibt es Untersuchungen von LATTEUX (1995) und ZANKE (1995) hat für seine Pilotstudien in der Elbe eine mittlere und eine Extremtidensituation bestimmt, deren Kombination die Rechenzeit erheblich reduziert hat. Im tidefreien Bereich hängt jedoch ein sediment-transport-intensives Ereignis von den Wind- und Seegangsverhältnissen ab, deren Eintritt nur schwer vorhergesagt werden kann. Auf der Basis von Bewertungen vergangener Ereignisse kommt hier der Szenariendefinition besondere Bedeutung zu.

2.2 Virtuelles Institut MorWin

Die Aufgabenstellung zur morphodynamischen Modellierung erfordert die Bündelung von Ressourcen ähnlich einer task force mit Partnern aus den Bereichen numerische Modellierung (mit den Schwerpunkten Strömung, Seegang und Sedimenttransport), sowie Experten für Informations- und Kommunikationstechnik (Datenhaltung, Vernetzung, Dokumentation, Benutzeroberflächen) und Analysemethoden (Statistik, Szenarien). Weiterhin bildet die Datenbeschaffung einen eigenständigen Bereich, der insbesondere auch Bundes- und Landesbehörden mit einbindet.

Für diese interdisziplinäre Arbeitsgruppe wird mit dem **Virtuellen Institut** eine effiziente Projektarbeitsumgebung durch den Einsatz zeitgemäßer Kommunikationsmethoden im Internet geschaffen. Eine Anwendung von Telekooperation für eine dezentrale (verteilte) Projektbearbeitung im Küsteningenieurwesen existierte bisher noch nicht und wird in MORWIN (1997) erstmals erprobt.

2.2.1 Organisation

An der Projektgruppe beteiligen sich von Hochschuleite Einrichtungen der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, der Technischen Hochschule Darmstadt und der Universität Hannover. Seitens der Bundes- und Landesbehörden sind die Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord in Kiel und das Wasser- und Schifffahrtsamt Stralsund sowie das Staatliche Amt für Umwelt und Natur (STAUN) in Rostock beteiligt. Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz begleitet die Arbeiten.

Eine Steuergruppe, gebildet aus den Projektleitern in allen beteiligten Institutionen sowie externen Beobachtern, übernimmt die Koordination der Aktivitäten und berät zweimal jährlich. Die Mitarbeiter der verteilten Arbeitsgruppen treffen sich regelmäßig zu Workshops für ausgewählte Themenbereiche.

Der Projektfortschritt wird online dokumentiert und ist unter der Internet-Adresse <http://morwin.bauinf.uni-hannover.de> im WorldWideWeb (Web) zu erreichen. Darüber hinaus wird jährlich ein Zwischenbericht erstellt. Diese Meilensteine sind ebenfalls im Netz verfügbar und werden zusätzlich als CD mit einem Begleitheft veröffentlicht.

Abb. 8 zeigt die Vernetzung der MorWin-Projektpartner im Internet. Die Universitäten sind unmittelbar über ein Hochgeschwindigkeitsnetz (WIN) angeschlossen, während die Verwaltungsdienststellen über ISDN-Verbindungen und Providerdienste (WIN Shuttle vom DFN Verein) ins Internet gelangen.

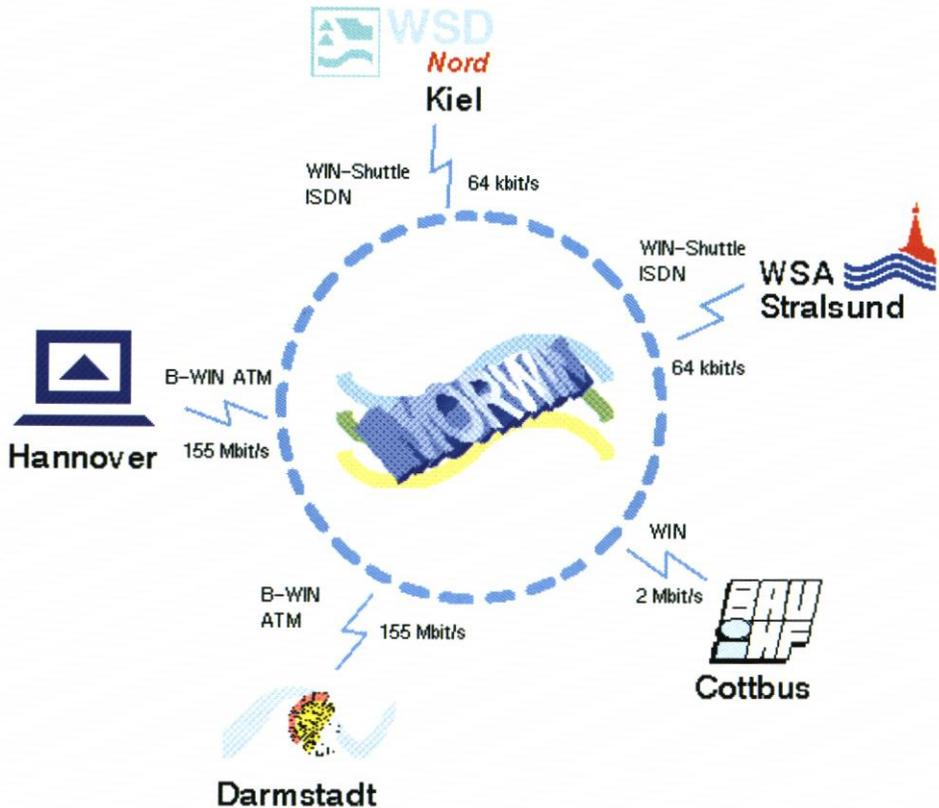


Abb. 8: MorWin-Projektpartner im Internet

2.2.2 Arbeitsweise

Die im Verbund arbeitenden Ingenieure profitieren von einheitlichen Analyse-, Präsentations- und Dokumentations-Methoden, die auf projekteigenen Web-Servern effizient gepflegt werden können. Eine gemeinsame Datenhaltung aller Projektdaten im Netz ermöglicht weiterhin den Aufbau einer Wissensbank, in der sämtliche Analysen verfügbar sind. Das somit geschaffene Online-Diskussionsforum unterstützt und beschleunigt den Dialog zwischen Modellentwicklern, Datenlieferanten und Modellanwendern (Auftraggebern).

Informationen aus verteilten Quellen sind mit Hilfe einer standardisierten Benutzeroberfläche für das Internet (Web Browser) an jedem Arbeitsplatz zugänglich. Das Verschneiden von Daten aus Naturmessungen und numerischen Simulationen zur Validation der Modelle sowie zur Systemanalyse der Küstengewässer ist jederzeit als transparenter Bearbeitungsprozeß online nachvollziehbar. Die damit erreichte Offenheit des Modellierungsprozesses trägt erheblich zur Qualitätssicherung der Ergebnisse bei, da insbesondere von seiten der Anwender schon frühzeitig Bewertungen einfließen können, die auf Erfahrungen vor Ort beruhen und nicht exakt als Daten dokumentiert sind.

2.2.3 Technologiehintergrund

Die Weiterentwicklung von Simulationsmodellen, Darstellungs- und Bearbeitungsmethoden zu einer webbasierten Modellierungsumgebung ist die konsequente Umsetzung netzbasierter Arbeitsansätze aus dem Küsteningenieurwesen (HOLZ u. LEHFELDT, 1991) mit zeitgemäßen Technologien. Dies berührt sowohl den Prozeß der Modellbildung als auch den der Programmierung. Durch den Einsatz der objektorientierten Programmiersprache JAVA werden alle Bausteine einer solchen Arbeitsplattform implizit internetfähig.

Die „Software Engines“ zum Rechnen, Analysieren und Bearbeiten sowie alle Komponenten von Benutzeroberflächen für Visualisierung, Datenhandling und Modellsteuerung bauen auf dem JAVA Development Kit (<http://www.javasoft.com/nav/whatis/index.html>) auf. Durch das Prinzip einer „virtuellen Maschine“, die sich auf sämtlichen Computer-Plattformen für die jeweiligen Anwendungen identisch verhält, wird Unabhängigkeit von Besonderheiten einzelner Betriebssysteme erreicht. Programmsysteme für verteilte Projektarbeitsumgebungen lassen sich auf diese Weise konsistent entwickeln und warten.

Mit dem Einsatz von Web-Technologie werden nützliche Multimedia-Komponenten verfügbar, die Bildmaterial aus Befliegungen oder Satellitenaufnahmen darstellen, Karten analog oder digital anzeigen, Video-Aufnahmen einbinden, Animationen von Simulationsergebnissen ablaufen lassen und weitere Meta-Informationen verwalten können. Die Quellen dieser verschiedenartigen Objekte liegen verteilt auf mehreren Webservern und bilden zusammen mit den topographischen, hydrologischen und meteorologischen Daten die Informationsbasis in der Projektarbeitsumgebung.

Lokale Dateisysteme werden durch die Web-Technologie zu einer virtuellen Einheit zusammengeschlossen, die sich konsistent für alle Partner aus Forschung und Verwaltung darstellt (MOLKENTHIN u. HOLZ, 1998). Derzeit wird daran gearbeitet, die vorhandenen Daten und ihre netzartig strukturierten Beziehungen entsprechend zu modellieren und in einer objektorientierten Datenbank (POET) zu speichern, um differenziertere Zugriffsmöglichkeiten bereitstellen zu können.

Projekteigene Webserver bieten Informationen auf Hypertext-Seiten (HTML) an, die weitergehende Betrachtungsweisen eröffnen, indem über eingebaute „links“ Hintergrundin-

formationen, Seitenaspekte, Tabellenwerke usw. auf anderen Seiten erreichbar werden. Weiterhin können über interaktive Elemente Analyse- oder Darstellungswerkzeuge genutzt werden, die als Client/Server-Applikationen mit JAVA applets/servlets realisiert sind und benutzerdefinierte Aktionen ausführen.

Neue Projektbearbeitungstechniken erfordern neue Dokumentationstechniken. Die Abb. 9 verdeutlicht den Unterschied zwischen einem konventionellen Dokument auf Papier

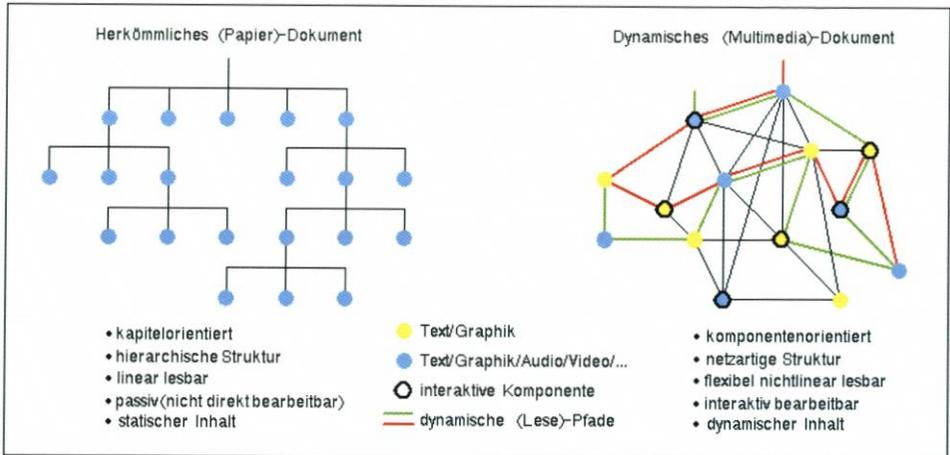


Abb. 9: Dokumente auf Papier und im Internet

und einem HTML-Dokument, das aus einer Informationswolke besteht und individuelle Betrachtungsweisen ermöglicht. Diese neue Form des Berichtswesens wird sachlich den komplexen Untersuchungsgegenständen gerecht, indem vielschichtige Informationen nach Bedarf zugänglich werden. Mit Hilfe von Lesepfaden, die vom Leser nach Bedarf erzeugt werden, kann jederzeit auf spezielle Themenbereiche fokussiert werden (LEHFELDT u. BRÜGGEMANN, 1998). Solche Funktionalität geeignet einzurichten ist Gegenstand der Forschung und geht über das hinaus, was von heutigen Web-Browsern an Editiermöglichkeiten angeboten wird.

Die jährlich von der Projektgruppe erstellten Meilenstein-Berichte sind in diesem Format abgefaßt. Neben einer kurzen ‚gedruckten Regieanweisung‘ sind die Informationen von einer CD abrufbar.

3. Modellanwendung

3.1 Eingesetzte Modelle

Im Rahmen des Projekts werden Modelle, die als Eigen- oder Weiterentwicklung der beteiligten Institute gelten, eingesetzt. Da sich das Testgebiet von MorWin über die gesamte Gellenbucht mit dem Küstenabschnitt zwischen Darßer Ort und Arkona, über die Darß-Zingster und die West-Rügensche Boddenkette, den Strelasund, Greifswalder Bodden und ein Seegebiet östlich von Rügen erstreckt, muß ein umfassendes Modell mit mittlerer Auflösung den Gesamtbereich abdecken, um auch die von den Windrichtungen abhängigen Wechselwirkungen zwischen Greifswalder Bodden auf der Ostseite und der Gellenbucht auf der

Nordseite des Systems erfassen zu können. Erste Untersuchungen mit Teilmodellen, die den Seebereich nicht einschlossen und Randbedingungen im Greifswalder Bodden und seewärts der Nordzufahrt benutzten, zeigten sehr schnell, daß hier eine Betrachtung des Gesamtsystems erforderlich war. Darum wurde von dem Gebiet, das in Abb. 4 dargestellt ist, ein hochauflösendes hydrodynamisches Küstenmodell mit Strömungs-, Wind-, Seegang- und Sediment-Modellkomponenten (MILBRANDT, 1995) aufgebaut und validiert. In diesem Modell werden die Navier-Stokes-Gleichungen auf der Basis eines FE-Gitternetzes gelöst.

Eingangswerte für dieses Modell liefert ein dreidimensionales Zirkulationsmodell der Ostsee (KLEINE, 1994). Die hydrodynamischen Randwerte für Strömung, Wasserstand und Seegang sowie die meteorologischen Randwerte für Wind liegen in Auflösungen zwischen 1 und 10 m im Bereich der Gellenbucht vor. Die erforderlichen Steuerdaten werden räumlich auf das wesentlich feinere Gitter des Küstenmodells interpoliert. Darüber hinaus muß auch zeitlich interpoliert werden, weil die Randbedingungen nur als 1-Stunden-Werte für Strömung und Wasserstand bzw. 6-Stunden-Werte für Wind und Seegang zur Verfügung stehen.

Dieses Küstenmodell stellt somit das Bindeglied zwischen dem Globalmodell der Ostsee und noch zu beschreibenden Detailmodellen her. Es liefert einen Überblick über die Strömungen und Wasserstände bei verschiedenen Wind- und Seegangsszenarien im Untersuchungsbereich. Die ermittelten Strömungs- und Seegangsverhältnisse im Flachwasser werden als Randbedingungen für morphologische Teilmodelle und den Betrieb eines Küstenprofilmodells benötigt.

Als Detailmodelle, die sich mit den kleinräumigen Prozessen auseinandersetzen sollen, werden die o. a. Lösung, aber auch bewährte Modellsysteme wie das in der Elbe-Pilotstudie (BARTHEL u. ZANKE, 1998; ZANKE, 1995) benutzte eingesetzt. Bei Testläufen eines 3D-Modells, das für dieses Projekt entwickelt wurde und für lokale Lösungen herangezogen werden soll, hat sich bereits gezeigt, daß 3D-Effekte im Bereich der tiefen Rinnen, aber auch im Küstenvorfeld eine Rolle spielen können. Abb. 10 zeigt das Ergebnis einer solchen Testrechnung und demonstriert, daß bei bestimmten Windrichtungen mit entsprechendem Stau im Bereich des Gellenstroms Unterströmungen erzeugt werden, die in seewärtiger Richtung Material verlagern können.

Die Kenntnis des Küstenlängstransports entlang der Darß-Zingster Küste und der Insel Hiddensee ist eine wesentliche Voraussetzung für die Modellierung des Problemgebiets um den Bock. Dazu werden im Vergleich ein von der Universität Riga entwickeltes 1D-Profilmodell (SENNIKOVs et al., 1998) und das bekannte System COSMOS (SOUTHGATE u. NAIRN, 1993) von HR Wallingford eingesetzt. In Profilen normal zum Strand werden die Verformungen des Seegangs auf der Basis der monochromatischen Theorie, die 'radiation stresses' und Sedimenttransport (bedload und suspended load) berechnet. Der Vergleich mehrerer Profile (Materialdurchgang) und die Bestimmung von Zonen des Auf- und Abtrags ist wenig rechenaufwendig. Daher sind Langfristsimulationen mit geringem Zeit- und Kostenaufwand möglich.

Es sind für den o. a. Bereich 20jährige Nachhersageläufe vorgesehen, deren Ergebnis sich auf die Länge der Vorhersage auswirken wird. Bis zum Redaktionsschluß lagen die Ergebnisse des Vergleichs noch nicht vor.

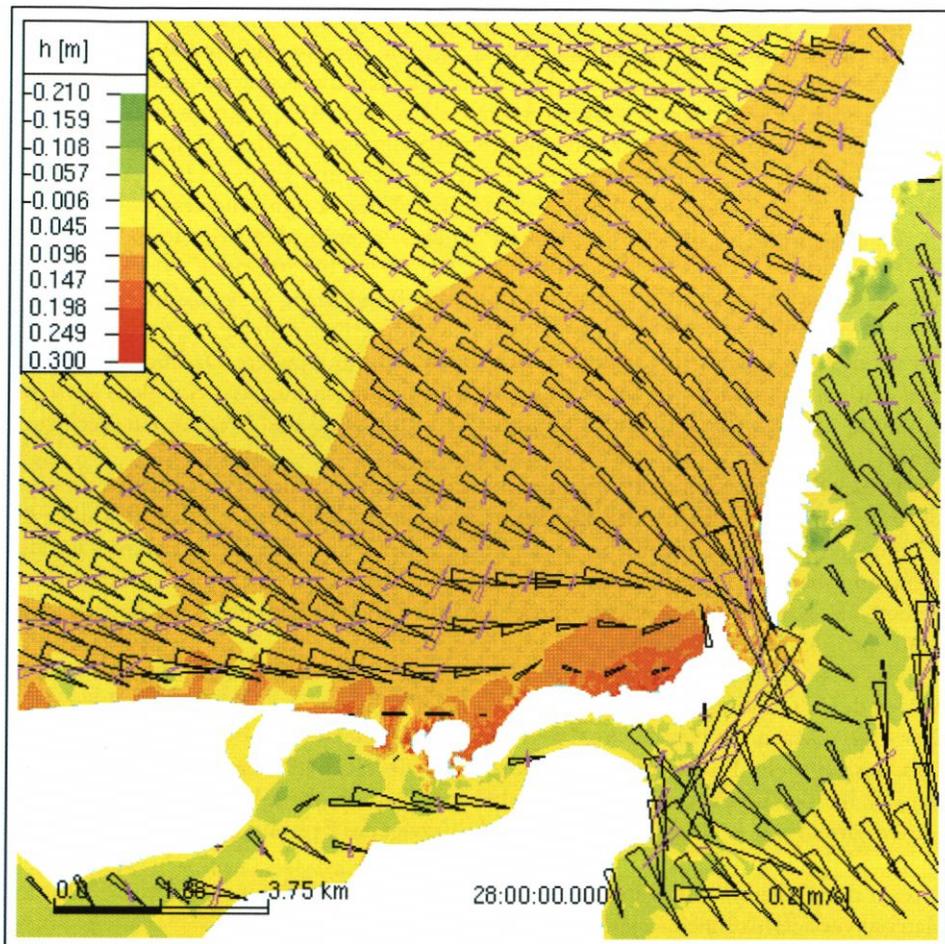


Abb. 10: Dreidimensionales Strömungsfeld in der Gellendüppel

3.2 Informationsbasis

Topographie

Die erforderlichen Daten zur Beschreibung der Topographie und Bathymetrie des Testgebietes wurden aus Unterlagen des BSH (Topographie) und Datenbeständen vom STAUN Rostock (Küstenlinien, Strandprofile) und der WSV (Fahrinnen, Sandbank „Bock“) gewonnen. Die Tiefendaten, die in unterschiedlichen Bezugssystemen (S42/83, WGS84, DHDN) vorliegen, wurden so transformiert, daß ein einheitliches Bild des Küstenraumes vorliegt. Eine direkte Vermaschung dieser Tiefendaten und Einrechnung in ein Gitternetz für die weitere Verarbeitung liefert ein digitales Geländemodell, das sich zur Visualisierung eignet, aber zum Betrieb von numerischen Simulationsmodellen in der Regel nicht eingesetzt werden kann. Es dient als geometrisches Referenzmodell.

Eine Reihe von früheren Luftbildern stellt eine wertvolle Basis für die Beurteilung der



Abb. 11: Luftbild von der Sandbank „Bock“

Situationen dar, aus denen sich die heutige Sandbank „Bock“ entwickelt hat. Die Luftbilder konnten bis in das Jahr 1934 zurückdatiert werden; neuere Aufnahmen der Topographie auf Luftbildbasis aus dem engeren Untersuchungsbereich stammen aus dem Jahr 1997. In Abb. 11 ist das Windwatt Bock bei einem Wasserstand von $-0,10$ m als ausgedehnte Fläche zu erkennen. Zusammen mit den Seekarten und Profilaufnahmen aus verschiedenen Zeiträumen wurde hier eine Datenbasis erstellt, die es gestattet, kurz- und mittelfristige Prozesse zu verfolgen und zu bewerten.

Gittergenerierung

Die Lösung der Flachwassergleichungen wird auf der Basis Finiter Elemente durchgeführt. Diese Dreieckselemente müssen bezüglich Form und Größe geometrischen Anforderungen genügen, um physikalische Prozesse hinreichend erfassen, Ränder und Übergänge von Wasser zu Land ähnlich beschreiben und numerische Stabilitätskriterien erfüllen zu können.

Die derzeit automatisch erzeugbaren Gitternetze müssen heute noch bei den meisten Modellen manuell nachgebessert werden. Dieser iterative und somit aufwendige und schwer reproduzierbare Prozeß wird bei den für MorWin in der Entwicklung befindlichen Gitternetzgeneratoren weitgehend ersetzt durch die Vorgabe von Kriterien zur Erzeugung geeigneter Netze (HORSTMANN, 1998). Bei einer Rohdatenbasis von mehr als 1 Million Tiefenpunkten und den projektbedingten Anforderungen sind herkömmliche Arbeitsmethoden nicht mehr wirtschaftlich.

Das hydrodynamische Übersichtsmodell wird auf einem Gitternetz von ca. 20 000 Knoten betrieben. Die Kantenlängen der Elemente variiert zwischen wenigen Metern im Strandbereich und einigen hundert Metern im Übergangsbereich zum Ostsee-Zirkulationsmodell. Abb. 12 zeigt einen Ausschnitt des Gitternetzes, bei dem die unterschiedliche Auflösung leicht zu erkennen ist.

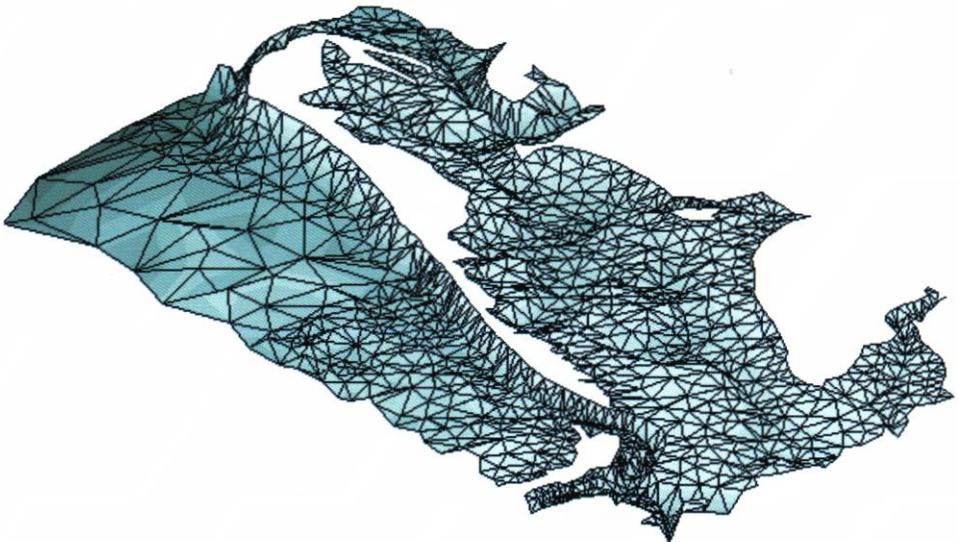


Abb. 12: Gitternetz bei der Sandbank „Bock“

Wasserstand, Strömung und Seegang

Im Gesamtbereich werden von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung eine Vielzahl von Wasserstandsmeßstellen kontinuierlich betrieben. Dazu gibt es Meßstellen, die vom Land Mecklenburg-Vorpommern unterhalten werden, und die neben Wasserstandsdaten auch Seegang und Wassergütedaten registrieren. Die Aufbereitung dieser Daten und Bereitstellung in einer Datenbank nahm einen großen Teil der Projektdefinitionsphase in Anspruch.

Naturmeßdaten der Strömungen sind erheblich schwieriger und aufwendiger zu ermitteln. Eine Prüfung der Archive der ehemaligen DDR zeigte, daß aus der Zeit vor der Wende keine verwertbaren Unterlagen vorlagen. Die im WSA Stralsund 1995 mit 15 Strömungsmeßgeräten an 6 Stationen vorgenommenen Naturmessungen beschränken sich nur auf den Strelasund. Zusätzlich wurden für spezielle Fragestellungen 1998 weitere Messungen mit 17 Geräten an 10 Positionen im Seebereich vor Hiddensee und im Gellenstrom durchgeführt.

Wertvolle Zusatzinformationen können dem baroklinen Modell des BSH entnommen werden, das mit einer Auflösung von 1 sm seit 1993 in 60-min-Intervallen in mehreren Schichten Strömungsstärke und -richtung ermittelt. Für die Erstellung von verlässlichen Randwerten für ein lokales Modell ist diese Auflösung jedoch zu grob.

Seegangsmessungen liegen ebenfalls nur in begrenztem Maße vor. Seit 1990 werden von der GKSS kontinuierlich Seegangsmessungen an einer Position vor Zingst durchgeführt. Eine stündliche Spektralanalyse der Daten ist gespeichert. Darüber hinaus werden vom BSH Modellergebnisse von Seegangssimulationen auf einem 15-km-Gitternetz in 6-Std.-Zeitintervallen vorgehalten.

In diesem Zusammenhang muß auf die Bedeutung von Starkwindsituationen hingewiesen werden. Die mittlere Situation an der Ostseeküste ist durch einen Wasserstand von $\pm 0,30$ m und Wellenhöhen von wenigen Dezimetern gekennzeichnet. Unter diesen Bedingungen findet nur ein geringer Sedimenttransport statt, auch wenn die Windwatten überstaut sein sollten. Unterschiedliche Windrichtungen im Bereich Hiddensee und Greifswalder Bodden können jedoch schon zur Ausbildung von Wasserstandsgradienten im Strelasund und dementsprechend zu merkbaren Strömungen führen. Bereits REINHARD (1953) stellte fest, daß diese Strömungen in entscheidendem Maße zur Abrasion der westlichen Kante der Insel Hiddensee und der östlichen Kante des Bocks führen. Ihnen kommt daher entscheidende Bedeutung bei der Beurteilung der morphodynamischen Prozesse zu. Dementsprechend ist die Erfassung der Windstärken und -richtungen im Untersuchungsgebiet ein entscheidender Faktor.

3.3 Erste Ergebnisse

Die bisher durchgeführten Simulationsrechnungen mit und ohne Sedimentbewegung haben in der Art von ‚quick-look-Analysen‘ Aufschluß über Einzelaspekte des Untersuchungsgebietes gegeben. Hierbei sind insbesondere zu nennen die Neufestlegung der Grenzen des Modellgebietes, erste Erkenntnisse über Strömungen, Seegang und Küstenlängstransport im Umfeld des Gellenstromes und des Windwatts ‚Bock‘. Der Vergleich der errechneten mit den gemessenen Größen verlief zufriedenstellend.

Die Abb. 13 zeigt dazu zwei typische Strömungssituationen im Dezember 1997 aus dem Zeitraum der Dauerstrommessungen (vgl. Abb. 3). Der Ausstrom bleibt konzentriert auf die Gellenrinne, während der Einstrom breit über dem Vierendhl Grund auffächert mit der Tendenz zur Sedimentation, wie bei Reinhard (vgl. Abb. 5) beschrieben.

Im Gegensatz zu derzeit üblichen Studien mit stationären Windfeldern aus systematisch veränderten Richtungen wird in dieser Untersuchung mit natürlichen Windzeitreihen gerechnet. Die notwendigen Steuergrößen für Wasserstände am Modellrand (vgl. Abb. 4) sowie Windfelder über dem Modellgebiet werden aus dem Zirkulationsmodell der Ostsee vom BSH übernommen. Auf diese Weise kann das Einlaufen von Extremereignissen, das nach BAERENS (1994) ca. 14 Tage dauert, mitsimuliert werden und sich die Wasserstands- und Strömungsmuster realistisch einstellen. Dazu ist auch eine Mindestausdehnung des Küstenmodells notwendig.

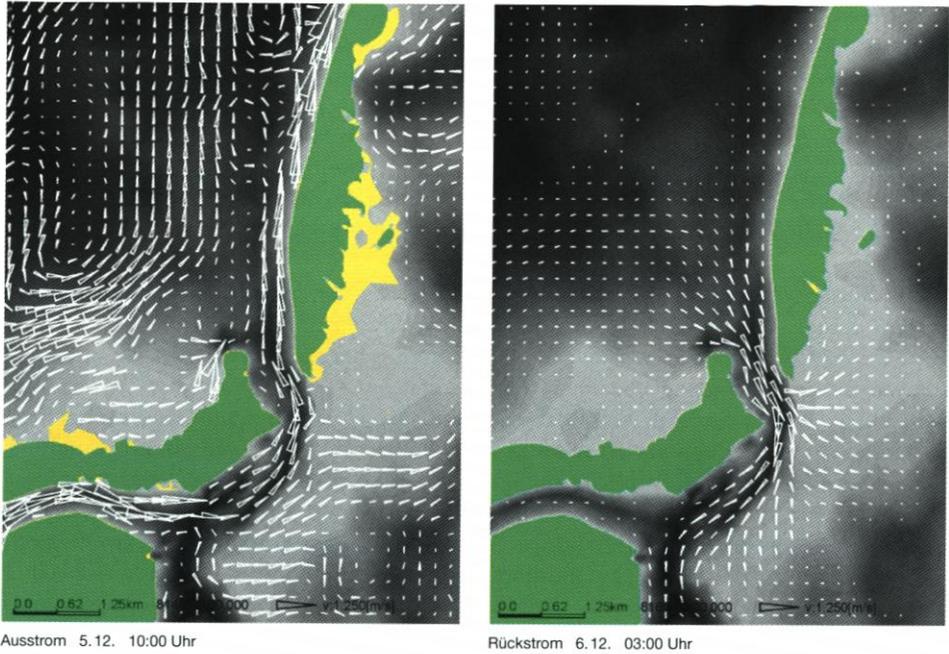


Abb. 13: Typische Strömungssituationen am 5./6. 12. 1997

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Bearbeitung komplexer Probleme im Küsteningenieurwesen durch den Einsatz dezentraler Datenbanken, Simulationstools und Expertise auf der Basis moderner Kommunikationstechnologie über das INTERNET ist bisher einmalig in Deutschland. Die Einbindung von Experten aus dem Bereich der Informatik, der numerischen Simulation, der Hydraulik und des angewandten Küsteningenieurwesens hat sich in der ersten Phase des Projekts MorWin bereits bewährt. Es kann nach Ablauf der ersten zwei Jahre der Förderung zusammenfassend festgestellt werden, daß

- die bisher erhobene Datenbasis für eine Verifikation der eingesetzten Modelle zwar ausreichend ist, für eine zweifelsfreie Szenariendefinition zur Morphodynamik in tidefreien Gewässern jedoch noch ergänzt werden sollte,
- ein effektives Informationsbasismodell aus heutiger Sicht auf der Grundlage einer objektorientierten Datenbank betrieben werden sollte,
- die Vernetzung und der Informationsaustausch im virtuellen Institut funktionsfähig sind, aber noch ausgebaut werden müssen; hierzu gehört auch der regelmäßige persönliche Erfahrungsaustausch zwischen den Mitarbeitern und zwischen Mitarbeitern und Projektmanagement, der sich in der set-up-Phase nicht nur auf mail-Austausch beschränken kann,
- nur der Einsatz modernster Rechen- und Kommunikations-Technik der Idee des virtuellen Instituts Rechnung trägt,
- der Einsatz mehrerer Modelle den Erfahrungsaustausch anregt und das Verständnis der involvierten physikalischen Prozesse fördert,

- nur die temporäre Zusammenführung von Disziplinen, die an der komplexen Aufgabe ‚morphodynamisches Modell‘ beteiligt sein müssen, in einem ‚virtuellen Institut‘ der Aufgabe in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht gerecht werden kann,
- diese Idee auf andere Bereiche, wie z. B. ein ‚Integriertes Küstenzonenmanagement‘, noch effektiver anwendbar sein wird, da ein IKZM ungleich mehr Disziplinen umfaßt als die morphodynamische Modellierung allein.

Die Arbeiten im Projekt haben zum Abschluß der ersten Phase einen Stand erreicht, der die Veröffentlichung der Methodik rechtfertigt und es gestattet, aus der Zusammenführung der Teilergebnisse Szenarien zur Simulation der Vorgänge im Gesamtsystem zu definieren. Daraus werden in der zweiten Hälfte der Phase II ingenieurpraktische Aussagen gewonnen werden können.

Die Arbeitsplattform für das virtuelle Institut hat sich durch die Einführung der Programmiersprache JAVA in ihrer Konzeption verändert. Dieser Änderung ist Rechnung zu tragen in der zweiten Phase.

5. Danksagung

Das Projekt wird seit 1. 1. 1997 unter dem Förderkennzeichen BEO 03 KIS 3120 vom Projektträger Biologie, Energie, Ökologie des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Bereich Meeres- und Polarforschung gefördert.

An dieser Stelle sei allen Mitarbeitern der Dienststellen und Institute herzlich gedankt, die ihre Daten an MorWin in digitaler oder analoger Form weitergegeben haben.

6. Schriftenverzeichnis

- BAERENS, Ch. et al.: Zur Häufigkeit von Extremwasserständen an der deutschen Ostseeküste, Teil I: Sturmhochwasser. Spezialarbeiten aus der AG Klimaforschung des Meteorologischen Instituts der Humboldt-Universität zu Berlin, No. 8, 1994.
- BARTHEL, V. u. ZANKE, U.: A Morphodynamic Model for River and Estuary Management. Proceedings ICCE '98, Copenhagen, Denmark.
- DANISH HYDRAULIC INSTITUTE: The Morphological Evolution around Thyboron – An Inlet at the North Sea, 8043-1/9511.bem/CED/IBH/JAZ, 1995.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (ed.): G8M Coastal Morphodynamics, Final Overall Meeting, Gdansk/Poland, 1995.
- FAS (Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau) Berlin: Modellversuche für Verbesserung des Westfahrwassers nach Stralsund, 1995.
- HORSTMANN, O.: Adaptive Grids for Hydroengineering Based Upon Predefined Construction Elements. Advances in Hydro-Science and -Engineering, Vol III, ICHE98 Cottbus/Berlin, 1997.
- HOLZ, P. u. LEHFELDT, R.: New Tendencies in Computer Assisted Design and Networking applied to Numerical Modelling in Coastal Engineering. Proc. Int. Conf. Computer Applications in Water Resources, Tamsui, July 3-6, Taiwan, S 1135-1165, (1991).
- JOHNSON, H., BRÖKER, I. u. ZYSERMAN, J. A.: Identification of Some Relevant Processes in Coastal Morphological Modelling, Proc. 24th Int. Conf. Coastal Engineering Research Council/ASCE, Oct 23-28, Kobe, Japan, S. 2871-2885, (1994).
- KLEINE, E.: Das operationelle Modell des BSH für die Nordsee und Ostsee. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg, 1994.
- LATTEUX, B. et al.: Long term morphological simulation under tidal current with non cohesive sediment, Europäische Kommission (ed.), G8M Coastal Morphodynamics, Final Overall Meeting, Gdansk/Poland, 1995.

- LEHFELDT, R. u. BRÜGGEMANN, M.: Multimedia Documentation in Coastal Engineering. In press, 1998.
- MILBRADT, P.: Zur Mathematischen Modellierung großräumiger Wellen- und Strömungsvorgänge (Dissertation), Institutsreihe des Inst. f. Bauinformatik, Universität Hannover, 1995.
- MOLKENTHIN, F. u. HOLZ, P.: Working Process in a Virtual Institute. Proc. Intl. Conf. Hydroinformatics '98 Copenhagen. In press.
- Morphodynamische Modellierung von Windwatten – Netzgestützte Projektbearbeitung im Küsteningenieurwesen. 1. Meilenstein 1997. <http://morwin.bauinf.uni-hannover.de>.
- NAIRN, R. B. u. SOUTHGATE, H. N.: Deterministic profile modelling of nearshore processes. Part 2. Sediment transport and beach profile development. Coastal Engrg 19, S. 57–96, 1993.
- NICHOLSON, J. et al.: Intercomparison of Coastal Area Morphodynamic Models. Coastal Engrg 31, S. 97–123, 1997.
- PRICE, D. M. et al.: PISCES A Morphodynamic Coastal Area Model, Final Report, SR-411, HR Wallingford, 1995.
- SENNIKOV, J., GRZHIBOVSKIS, R., BETHERS, U. u. HOLZ, P.: Multi-level Approach to the Estimation of the Load Transport Near Rügen. Advances in Hydro-Science and -Engineering, Vol III, ICHE98 Cottbus/Berlin, 1998.
- SOUTHGATE, H. N. u. NAIRN, R. B.: Deterministic profile modelling of nearshore processes. Part 1. Waves and currents. Coastal Engrg 19, S. 27–56, 1993.
- REINHARD, H.: Der Bock. Entwicklung einer Sandbank zur neuen Ostsee-Insel. VEB Geographisch-Kartographische Anstalt Gotha, 1993.
- TAUBER, F. u. LEMKE, W.: Map of Sediment Distribution in the Western Baltic Sea (1:100,000), Sheet „Darß“. DHZ 47, 3, S. 171–178, 1995.
- ZANKE, U.: Bericht zur morphodynamischen Berechnung der Elbe bei Glückstadt, Hydro-Consult Hannover, 1995.
- ZANKE, U.: Ein numerisches Modell für bewegliche Sohle. Wasser & Boden 12, S. 28–33, 1994.