

# **Simulation und Messung von Zirkulations- und Transportprozessen im Greifswalder Bodden, Oderästuar und den angrenzenden Küstengewässern**

*K. Buckmann, U. Gebhardt, A. Weidauer*  
IfGDV - Institut für Geographische Datenverarbeitung



*K.D. Pfeiffer, K. Duwe, J. Post, A. Fey, B. Hellmann*  
HYDROMOD Wissenschaftliche Beratung GbR



in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geographie  
der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald

Hinrichshagen, Wedel - 1999

Copyright © HYDROMOD, IfGDV 1998/99

# 1. Inhaltsverzeichnis

1. Inhaltsverzeichnis
2. Einleitung und Veranlassung
3. Übersicht über die angewendeten Methoden
4. Hydrographie, Zirkulation und Transporte im Untersuchungsgebiet
5. Daten- und Informationsbeschaffung, Auswertung und Bearbeitung
6. Numerische Modellierung
  - 6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der zweidimensionalen Simulationen
  - 6.2 Zusammenfassung der Ergebnisse der dreidimensionalen Simulationen
  - 6.3 Vergleich der zwei- und dreidimensionalen Methodenansätze
7. Zusammenfassung der Erfahrungen
  - 7.1 Synoptische hydro-meteorologische Meßkampagnen
  - 7.2 Möglichkeiten der numerischen Modellierung
  - 7.3 Weiterführende Arbeiten
8. Quellenverzeichnis
9. Danksagung

## **2. Einleitung und Veranlassung**

In diesem zusammenfassenden Synthese- und Erfahrungsbericht werden die Ergebnisse des GOAP-Teilprojekts 2 - Messung und Modellierung von Transport und Austauschprozessen im Greifswalder Bodden und im Oderästuar - zusammengefaßt. Die Arbeiten wurden von 1993 bis 1997 vom Institut für Geographie der Ernst-Moritz-Arndt Universität Greifswald, der Firma HYDROMOD Wissenschaftliche Beratung GbR in Wedel und der Firma IfGDV - Institut für Geodatenverarbeitung in Hinrichshagen durchgeführt.

Sie bestanden zum einen in Gewinnung und Aufbereitung hydrographischer Daten im Greifswalder Bodden und im Oderästuar, zum anderen in Anpassung und Plausibilisierung hochauflösender zwei- und dreidimensionaler Modelle, gefolgt von Durchführung fall- und szenarienspezifischer Simulationsrechnungen und der Auswertung dieser Ergebnisse.

Die Ziele dieser Arbeiten bestanden einerseits in der Gewinnung, Auswertung und Bereitstellung von aufbereiteten Meßdaten und Simulationsergebnissen zwei- und dreidimensionaler Modelle. Diese stellten eine wesentliche Grundlage für weiterführende Arbeiten und Untersuchungen in diesem und anderen Teilprojekten im GOAP-Forschungsverbund dar. Weiterhin wurden wertvolle Erfahrungen zur numerischen Modellierung in den Untersuchungsgebieten gewonnen und methodische Ansätze zur synoptischen und integrierten Betrachtung der grundlegenden physikalischen Prozesse mittels numerischer Modelle verbessert.

Dieser Bericht reflektiert insbesondere die letztgenannten Aspekte in komprimierter Form.

### 3. Übersicht über die angewendeten Methoden

Die zur durchgeführten Arbeiten und die hierzu verwendeten Methoden bestanden kurzgefaßt in:

- Beschaffung, Auswertung, Bewertung und Aufbereitung vorhandener Daten- und Informationen; insbesondere zur Erstellung einer konsistenten, hochauflösenden Modelltopographie, Rand- und Anfangsbedingungen sowie meteorologischer und hydrologischer Antriebsdaten.
- Durchführung von in-situ Messungen im Rahmen der im GOAP-Vorhaben durchgeführten synoptischen Meßkampagnen, Beschaffung komplementärer hydrologischer, hydrographischer und meteorologischer Daten von Meßnetzen in Deutschland und Polen, aus fachverwandten Forschungsarbeiten (TRUMP) und aus der Fernerkundung (LandSat, AHVRR, ERS-1) sowie deren zielbezogenen Auswertung und Aufbereitung.
- Anpassung bestehender hochauflösender zwei- und dreidimensionaler Zirkulations- und Transportmodelle für das Untersuchungsgebiet und für einzelne Teilgebiete sowie deren Qualifikation und – soweit mit den o.g. Datensätzen möglich – Verifikation.
- Simulationen von Jahrgängen mit dem zweidimensionalen Modell des gesamten Untersuchungsgebietes sowie von kurzperiodischen Ereignissen; weiterhin Fallstudienberechnungen mit dreidimensionalen Modellen einschließlich Auswertung und Bewertung der Modellergebnisse.



Abbildung 1: Schematische Darstellung des Untersuchungsgebiets.

#### 4. Hydrographie, Zirkulation und Transporte im Untersuchungsgebiet

An dieser Stelle sollen summarisch und zusammenfassend die wichtigsten hydrographischen, für Transport-, Austausch- und Vermischungsvorgänge relevanten Prozesse im Untersuchungsgebiet beschrieben werden. Bezüglich detaillierterer Ausführungen hierzu wird auf die umfangreiche Literatur, vorhergehende Arbeiten der Berichtersteller, Forschungs- und Zwischenberichte aus GOAP und anderen Forschungsprojekten (z.B. TRUMP, EU-ENVIRONMENT Projekt ODER) sowie auf weitere, hier nicht im einzelnen aufgeführte Quellen und grundlegende Literatur zum Untersuchungsgebiet verwiesen. Die untenstehenden Ausführungen beinhalten teilweise bereits thematisch im Zusammenhang stehende Bewertungen der Ergebnisse der im GOAP-Projekt durchgeführten Simulationsrechnungen.

Die komplexen und unterschiedlichen bathymetrischen und hydro-meteorologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet, insbesondere das Fehlen relevanter (periodischer) Tidesignale und der u.a. hieraus resultierenden komplizierten, überwiegend durch Wind, Luftdruck, Eigenschwingungen, Baroklinität, Abfluß, Reibung und Vermischung dominierten Zirkulationsregime, stellen an die numerische Modellierung hohe Anforderungen.

Das Untersuchungsgebiet läßt sich in drei Regionen mit unterschiedlicher hydrographischer Charakteristik unterteilen:

- Im Nordwesten liegt der Greifswalder Bodden, eine halboffene, im Süden vom Festland, im Norden von der Insel Rügen eingeschlossene, im Zentralbereich relativ tiefe Bucht. Sie steht mit der Pommerschen Bucht im Westen über eine relativ breite, jedoch weitgehend flache Schwelle in Verbindung; westwärts besteht eine sich verengende Verbindung mit den angrenzenden Boddengewässern über den Strelasund.
- Im Süden liegt das Oderhaff, welches mit den angrenzenden Küstengewässern über drei Mündungsarme, dem Peenestrom im Westen, der Swine im Zentrum und der Dziwna im Osten in Verbindung steht und vorwiegend von der Oder gespeist wird.
- Die beiden Gebiete grenzen im Osten bzw. Norden an die Pommersche Bucht, ein weitgehend offenes und relativ flaches Küstengewässer der mittleren Ostsee.

In der untenstehenden Tabelle sind einige Kenngrößen des Untersuchungsgebietes und der wichtigsten Teilgebiete aufgeführt.

Teilgebiet	Fläche [km <sup>2</sup> ]	mittlere Tiefe [m]	Volumen [km <sup>3</sup> ]
Kleines Haff	277,0	3,70	1,026
Großes Haff	409,9	3,80	1,557
Greifswalder Bodden	510,0	5,80	2,960
Peenestrom	86,9	2,60	0,203
Achterwasser	77,0	2,90	0,226
<b>Gesamt</b>	<b>1.360,8</b>	<b>4,40</b>	<b>5,972</b>

Tabelle 1: Hydrometrische Angaben zum Oderästuar (nach GOAP Zwischenbericht 1996 von Buckmann, Jonas, Lampe und Meyer).

Für den Massen-, Energie- und Stoffaustausch zwischen Ostsee und Oderhaff hat das Mündungsgebiet der Swine zentrale Bedeutung. Circa 70% der Wasser-, Salz- und Energietransporte erfolgen über den künstlich angelegten, auf mindestens 12,5 Meter Tiefe



Schichtung in den Kanalsystemen interne Seiches angeregt werden, welche zu ausgeprägten, durch die Kanaltopographie modifizierten lokalen Oszillationen der Sprungschicht führen.

Das bei ruhigen Wetterlagen vorhandene sensible, durch den baroklinen Druckgradienten und den Oberwasserabfluß balancierte Gleichgewicht wird durch die oben kurz angeführten Prozesse, insbesondere durch immer vorhandene kleinere Schwankungen des lokalen Windfeldes oder durch windbedingte und/oder durch barokline Prozesse verursachte Schwankungen des mittleren Wasserstands der Pommerschen Bucht ständig gestört. Hierbei können nach Hypothesen polnischer Kollegen ggf. auch durch die sehr geringen, jedoch persistent periodisch auftretenden kleinen Gezeiten der Ostsee und hierdurch generierten Resonanzen eine Rolle spielen. Dies führt, insbesondere im Mündungsgebiet der Swine und im äußeren Teil des Swine-Kanals

- zu erheblichen Variabilitäten im Strömungsfeld und im Ein- und Ausstromverhalten
- - ebenfalls in den Mündungsbereichen von Peene und Dziwna beobachteten - schnellen Änderungen von Ein- und Ausstromlagen
- Sprungschichttiefen
- Auf- und Abbau von Schichtungen
- rapide erfolgendem Umschlagen der Strömung

Salzwasserzufluß in das Oderhaff, Brackwasserbildung und Vermischung erfolgen bei den zuvor beschriebenen mittleren Ein- und Ausstromlagen überwiegend in den tiefen Bereichen des Swine- und Piastowski-Kanals und im Haff sowie bodennah entlang des Schiffahrtskanals nach Stettin (Kaiserfahrt). Hierbei kann Salzwasser bodennah, jedoch fast ausschließlich entlang des Schiffahrtsweges, bis weit ins Haff vordringen. Nur bei relativ flachen Lagen der Sprungschicht können geringe Mengen von Ostseewasser über das Sill an der Mündung der Alten Swine in die nordöstlichen Bereiche des Haffs eingetragen werden, wo dann zeitweise schwach ausgeprägte bodennahe Schichtungen beobachtet werden. Der Beitrag der beiden genannten Prozesse zur Wassererneuerung des Oderhaffs ist gering, da das schwerere salzreichere Wasser sich in haffseitig immer dünner werdenden Schichten in den tiefen Bereichen ansammelt. Es kann daher nicht oder kaum über die Böschungen des Schiffahrtsweges seitlich in das Haff vordringen.

Für Vermischung und Austausch von entscheidender Bedeutung sind starke Ein- und Ausstromereignisse, welche durch Schwankungen der mesoskaligen Wind- und Luftdruckfelder und hierdurch generierte Wasserstandsschwankungen der Ostsee (Seiches) sowie des Haffs selbst generiert werden. Hierdurch kommt es zu starken Wasserstandsanstiegen im Haff mit entsprechend starkem Einstrom von Ostseewasser. An der Swinemündung und in den Kanalsystemen treten hierbei Strömungsgeschwindigkeiten von 1 m/s und mehr auf. Ostseewasser wird über die gesamte Tiefe sowohl über den Swine-Kanal als auch über die Alte Swine in das Haff transportiert. Dort breitet es sich, je nach vorherrschenden Windverhältnissen und der im Haff erzeugten Zirkulations- und Rezirkulationsmustern, nach Süden, Osten und Westen aus. Für die Ausbreitung von Ostsee- und Brackwasser kommt dem tieferen Durchlaß zwischen Großem und Kleinem Haff eine zentrale Bedeutung zu. Hierdurch können große Mengen von salzreicherem Wasser, vorwiegend in den tiefergelegenen Schichten, in das Kleine Haff transportiert, dort vermischt und rezirkuliert werden. Vermischung, Transport und Rezirkulation von Salzwasser im Oderhaff sind stark von der lokalen winderzeugten Zirkulation abhängig, welche eine ausgeprägte dreidimensionale Struktur besitzt. Das in den tieferen Kanälen eingetragene Salzwasser wird nach Ende eines Einstromereignisses in der Regel schnell wieder aus dem Haff transportiert. Dies ist an Zeitserien des Salzgehalts im Mündungsbereich deutlich

ersichtlich. Demgegenüber können sich Teile des seitlich ins Haff eingetragenen und dort vermischten Salzwassers lange im Haff aufhalten. Dort erfolgt, je nach vorherrschender Zirkulation bzw. den lokalen meteorologischen Verhältnissen, mehr oder weniger intensive Vermischung. Dies hat die Ausbildung von teilweise stark inhomogenen Massenverteilungen in den tieferen Schichten zur Folge. Aufgrund der teilweise starken Salzgehaltsunterschiede zwischen Haff- und eingetragendem Ostseewasser, den bei ruhigen und mittleren Windverhältnissen geringen Geschwindigkeiten im Oderhaff und der geringen Turbulenz, kann die vertikale und horizontale Vermischung stark vermindert werden. Dies führt zur Bildung von relativ lange stabilen, isolierten Brack- und Salzwasserlinsen in Bodennähe.

Der Greifswalder Bodden (siehe hierzu /2/) ist mit einer Fläche von 510,2 km<sup>2</sup> und einem Volumen von 2.960 Millionen m<sup>3</sup> das größte der vorpommerschen Boddengewässer. Östlichster Punkt ist die Insel Ruden. Zwischen ihr und der Insel Rügen im Norden bzw. der Insel Usedom im Süden bestehen flache Verbindungen zur Oderbucht mit Breiten von sieben bzw. zwei Kilometern. Zwischen der Insel Usedom und dem Festland mündet der Peenestrom in den Greifswalder Bodden, der als westlicher Mündungsarm des Oderästuars der wichtigste Süßwasserzufluß zum Bodden ist.

Das submarine Relief gliedert sich deutlich in zwei Bereiche. Im westlich gelegenen Teil dehnt sich ein flaches, an morphologischen Strukturen armen Becken mit Tiefen von 6 bis 9 m aus, das durch mehrere Meter mächtige Schlickdecken weitgehend nivelliert wurde. Dagegen befinden sich im nördlichen und östlichen Teil zahlreiche Untiefen mit sandig-kiesiger Bedeckung, die durch meist rinnenartige, schlickführende Vertiefungen voneinander getrennt sind. Für die Hydrographie von Bedeutung ist - wegen ihrer Seegang und Wasseraustausch dämpfenden Wirkung - die sogenannte Boddenrandschwelle, die bei einer Breite von z.T. über einer Seemeile und Tiefen von nur 2 - 3 m in zwei großen Loben von Rügen über die Inseln Ruden und Greifswalder Oie bis Usedom reicht und als die submarine Fortsetzung der Endmoräne der Nordrügen-Usedomer Staffel gilt.

Für den Greifswalder Bodden entscheidend ist die sehr breite Verbindung über die Boddenrandschwelle zur Pommerschen Bucht. Ihr ist es zuzuschreiben, daß der Wasserstand dem der Ostsee ohne größere Phasenverschiebungen folgt. Dem starken Wasseraustausch über die Boddenrandschwelle hinweg ist es zuzuschreiben, daß sich der Salzgehalt im Greifswalder Bodden nur geringfügig von dem der Pommerschen Bucht unterscheidet und der Greifswalder Bodden in einer Wasserqualitäts-Rangfolge von allen vorpommerschen inneren Küstengewässern einen vorderen Platz einnimmt.

Im Verlaufe von und nach Starkwindereignissen aus östlichen Richtungen kann es jedoch zu stark ausgeprägten Salzschiebungen im Bereich des Rudenstromes und des nördlichen Peenestromes bis hinab nach Wolgast/ Hafen kommen (GOAP- Datenbank). Es wurden vertikale Gradienten von 4 psu und Verweilzeiten solcher Schichtungen von bis zu zwei Wochen gemessen (WSA Stralsund April/Mai 1993).

Einem langanhaltenden schnellen Fall des Pegels setzt die Boddenrandschwelle Grenzen, da der durchströmte Querschnitt sich schnell verringert. Daher liegen die Niedrigwasserwerte von Außenküstenpegeln hier deutlich unter den im Bodden gemessenen Werten. Bei Hochwasser vergrößert sich jedoch der Querschnitt, und der Greifswalder Bodden zeigt darüber hinaus die bei Buchten stets zu beobachtenden Staueffekte. Die Hochwasserwerte des Greifswalder Boddens liegen daher im Schnitt 20 bis 25 cm höher als beim Pegel Saßnitz. Dadurch stellt die Boddenrandschwelle an den Betrieb numerischer Modelle zur Berechnung



hydrodynamischer Parameter im Peenestrom und Achterwasser besondere Anforderungen hinsichtlich der Wahl der Steuerung.

Greifswalder Bodden und Oderhaff stehen über den Peenestrom miteinander in Verbindung. Dieser ist die längste der drei Verengungen zwischen Ostsee und Oderhaff. Bei einer Gesamtlänge von ca. 48 km untergliedert sich der Peenestrom in 3 morphologisch unterschiedlich gestaltete Abschnitte.

- Der nördliche Peenestrom ist 18,5 km lang und flußartig gestaltet; seine Breite liegt zwischen 0,2 und 0,9 km.
- An den nördlichen Peenestrom schließt sich im Süden das ca. 117 km<sup>2</sup> große seeartig erweiterte Gebiet, das Krumminer Wieck/Achterwasser-Gebiet, an. Bei Lassan und Quilitz beginnt der südliche Peenestrom. Zunächst sind hier Querschnittsbreiten von 1,8 bis 3,1 km auf einer Länge von 13 km anzutreffen. In der Nähe der Klotzower Fähre beginnt der nur 0,3 bis 1,0 km breite flußartig verlaufende, 7 km lange, südlichste Abschnitt des Peenestromes, der bei Karnin in das Oderhaff mündet (siehe hierzu auch /7/).
- Das Achterwasser nimmt unter den Boddengewässern nach der Größe den vierten und nach dem Volumen den fünften Platz ein. Das Wasseraustauschgeschehen des als polytroph anzusehenden Achterwassers folgt einem Jahresgang. In diesem strömen im November die größten, im Juli die geringsten Wassermengen ein- bzw. aus (/1/). Sein Salzgehalt schwankt zwischen 0,45 und 4,6 psu, wobei typische mittlere Werte im Sommer bei 0,5 bis 0,6 psu und im Winter bei 1 bis 2 psu liegen. Das Achterwasser gehört zu den am meisten ausgesüßten Bodden. Die höchsten Salzgehalte treten erwartungsgemäß im Winter auf (/1/). Auf Grund von winterzeugten und abflußbedingten Wasserstandsschwankungen zwischen dem Kleinen Haff und der Ostsee bzw. dem Greifswalder Bodden kommt es je nach der Gefällerrichtung zur Ausprägung von Aus- und Einstromlagen.

## 5. Daten- und Informationsbeschaffung, Auswertung und Bearbeitung

Die zentralen Ergebnisse der in GOAP durchgeführten Arbeiten zur Akquisition, Auswertung, Bewertung und Aufbereitung vorhandener und von Dritten beschaffter Daten, durchgeführter Feldmessungen und sonstiger Informationen bestanden im

- Erarbeiten einer das gesamte Untersuchungsgebiet umfassenden, konsistent referenzierten Bathymetrie mit 100 Meter Auflösung
- und in der Zusammenstellung einer konsistenten und qualitätskontrollierten, sowohl historische als auch szenarien- bzw. projektspezifische hydro-meteorologische Daten umfassenden Datensammlung zur Initialisierung, zum Antrieb, und zur Plausibilitäts- und Qualitätskontrolle numerischer Modelle.

Hierzu wurden sowohl aus unterschiedlichsten multi-disziplinären Quellen stammende Daten und Informationen gesammelt und verarbeitet, als auch in-situ Messungen im Greifswalder Bodden und im Oderhaff im Rahmen der GOAP-Synopten durchgeführt.

Weiterhin wurden von den Berichterstattern im Rahmen der GOAP-Synopten und der an GOAP angebotenen Dauermessungen hydrographische Messungen durchgeführt.

Im Sommer 1994 und 1995 wurden von HYDROMOD zwei intensive Meßkampagnen zusammen mit polnischen Kollegen in der Swine und im polnischen Teil des Großen Haffs durchgeführt. Hierbei wurde die Wassermassenverteilung quasi-synoptisch erfaßt und Dauermessungen von Wasserständen, Strömungen, Wassertemperatur und Salzgehalt im Mündungsbereich der Swine vorgenommen.

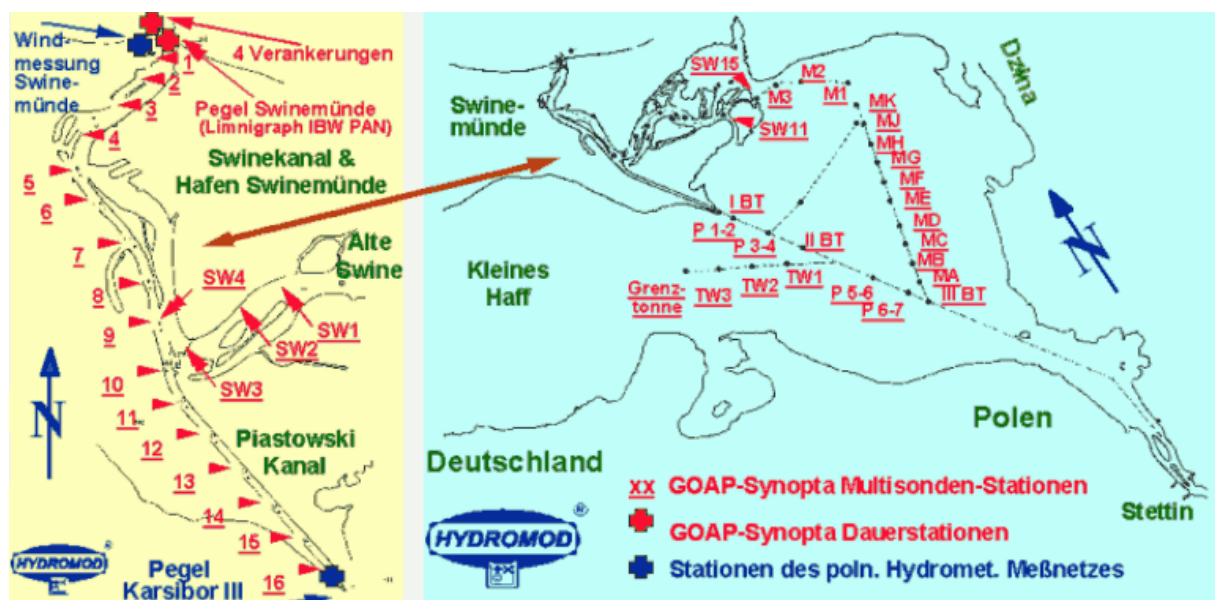


Abbildung 3: Stationsnetz der im Rahmen der GOAP-Synopta 1994 von HYDROMOD und IBW PAN durchgeführten Messungen im polnischen Teil des Oderhaffs und der Swine.

Detaillierte Informationen zu den beiden o.g. Meßfahrten, den Meßverfahren und zur Datenauswertung sowie die endprozessierten Daten der beiden o.g. Kampagnen sind in Ergebnisberichten und Datensammlungen des GOAP-Projekts enthalten und werden an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt.

## 6. Numerische Modellierung

Zur weiteren Bearbeitung der Themenstellungen wurden drei numerische Simulationsmodelle angepaßt und qualifiziert:

- ein vorhandenes zweidimensionales Zirkulationsmodell des gesamten Untersuchungsgebiets mit einer horizontalen Auflösung von 100 m (Modellversion IfGDV-2D-200-GOAP) mit projektspezifischen Ergänzungen zur Behandlung von Transportprozessen in Ästuaren und Küstengewässer mit einem speziell angepaßtes Simulationsmodul zur Berechnung von Temperatur- und Salzgehaltsfeldern (HYDROMOD-FCT-2D);
- ein vorhandenes dreidimensionales, baroklines Zirkulationsmodell des Oderhaffs mit einer horizontalen Auflösung von 250 m (Modellversion HYDROMOD-3D-ODE-250-GOAP);
- ein dreidimensionales, baroklines Zirkulationsmodell des Oderhaffs und den Greifswalder Boddens mit einer horizontalen Auflösung von 100 m des Oderhaffs und des Greifswalder Boddens (HYDROMOD-3D-ODE-GWB-100-GOAP).

Nach Qualifikation und - soweit es Dichte und Synopsis des Datenmaterials zuließen - Verifikation der Modelle wurden umfangreiche Nachhersagen und Szenariensimulationen sowie zielbezogene Auswertungen der Simulationsergebnisse durchgeführt. Diese bestanden insbesondere in

- Nachhersage zweier kompletter Jahresgänge (1994 und 1995) für das gesamte Untersuchungsgebiet mit dem o.g. zweidimensionalen Modell;
- Szenarien- und fallspezifische Untersuchungen zur Dynamik, Variabilität und Zirkulation sowie von Austausch- und Transportprozessen in den Untersuchungsgebieten mit den beiden o.g. dreidimensionalen Modellen.

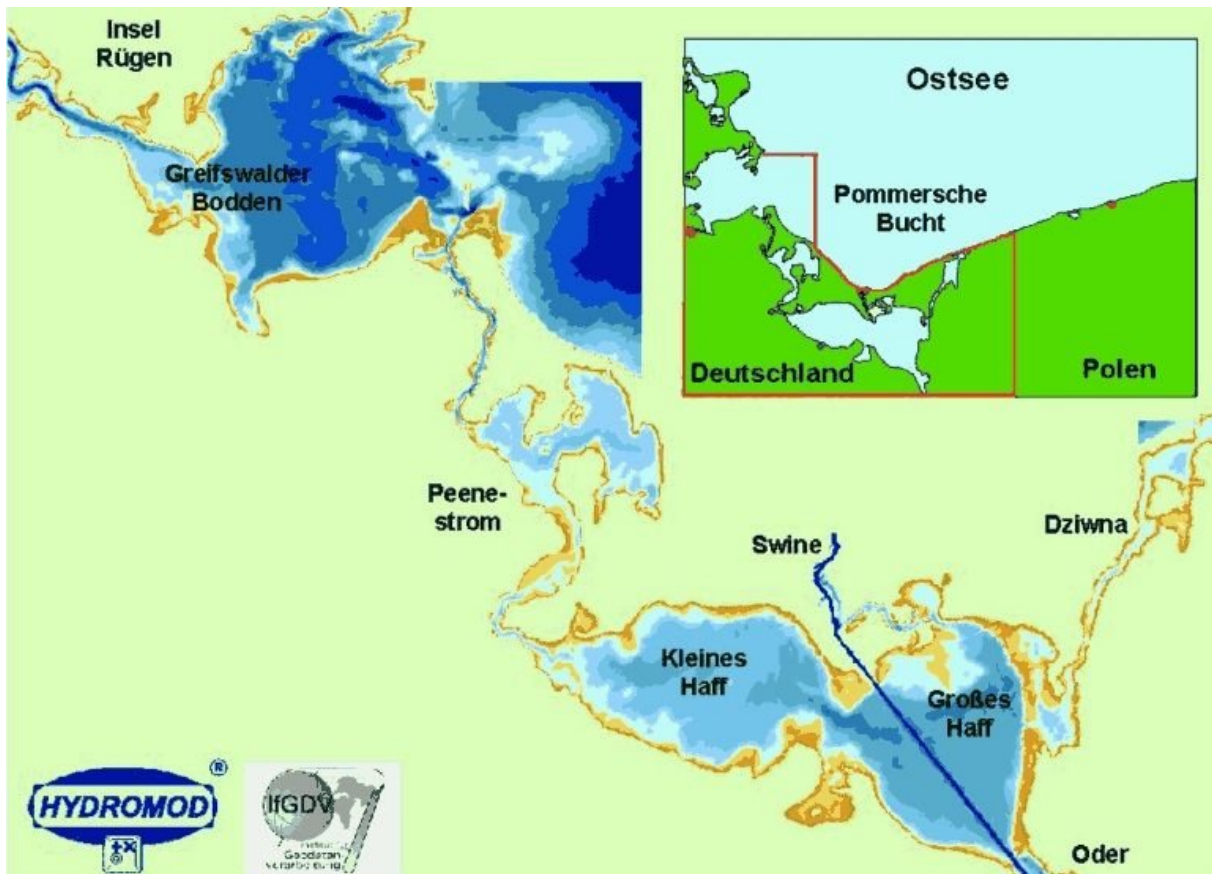


Abbildung 4: Bathymetrie des Untersuchungsgebiets und Grenzen der angewendeten Simulationsmodelle.

## 6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der zweidimensionalen Simulationen

Dem zweidimensionalen Modell kam im Projektkonzept von GOAP die Aufgabe zu, jährliche Wasserbilanzen des Untersuchungsgebietes zu berechnen. Wie in Messungen der Verfasser gezeigt wurde, existieren im Untersuchungsgebiet Teilbereiche, in welchen zeitweise größere vertikale Dichtegradienten vorkommen. Dies sind das Kanalsystem der Swine, das nördliche Oderhaff bis in den Tiefenbereich der deutsch-polnischen Grenze und der Auslauf des nördlichen Peenestromes bis zum Rudenstrom. Dort sind physikalisch genauere Beschreibungen von Wassermassencharakteristika nur mit dreidimensionalen Modellen möglich.

Kompliziertere Modelle, wie das hier beschriebene dreidimensionale Modell oder das vom GKSS Forschungszentrum angepasste Modellsystem (kombinierte Simulationsmodelle für 3D-Zirkulation, Wellen, lokale Meteorologie) benötigen gegenüber dem verwendeten zweidimensionalen Modell ein Vielfaches an Aufwand, Rechenzeit und Computerleistung. Sie konnten daher für Simulationen von Jahresgängen innerhalb der für GOAP vorgegebenen Rahmenbedingungen und verfügbaren Kapazitäten nicht eingesetzt werden. Eine weitere Aufgabe im Vorhaben bestand daher in der Durchführung von Vergleichsrechnungen, um herauszufinden, welche Fehlermargen und Einschränkungen die Verwendung eines zweidimensionalen Modells für Betrachtung und Quantifizierung des Wasseraustausches im Jahresgang impliziert.

Die bisherigen Ergebnisse von Vergleichsuntersuchungen mit dem hier beschriebenen dreidimensionalen Modell ergaben kein Argument, welches die von den Verfassern erwartete

Naturnähe der mit dem zweidimensionalen Modell errechneten jährlichen tiefengemittelten Wasserbilanzen im Gesamtgebiet in Frage stellt.



Abbildung 5: Übersichtskarte zu Meßpositionen, definierten Querschnitten und mit dem zweidimensionalen Modell berechneten Wasserbilanzen im Großen Haff, Peenestrom und Greifswalder Bodden.

Für die Erfassung der Wasser- und Salztransporte im Untersuchungsgebiet wurden 30 Querprofile und ein Längsprofil eingemessen (siehe Abbildung 5). Zusammen mit den in Tabelle 2 mitgeteilten Dimensionierungen der Profile, lassen sich aus den Verteilungen der Durchflüsse die Verteilungen der mittleren Stromgeschwindigkeiten und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten errechnen.

In jedem Gitterpunkt eines Profils sowie in weiteren "Sonderpunkten" des Untersuchungsgebietes sind im zeitlichen Abstand von 40 Minuten die Berechnungsergebnisse für die Parameter Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit in Betrag und Richtung sowie Salzgehalt und Temperatur gespeichert worden. Daneben wurden die berechneten zweidimensionalen Felder der genannten Parameter komplett alle sechs Stunden (viermal täglich) abgespeichert.

Der umfangreiche Datensatz enthält neben den jeweils 1.460 zweidimensionalen Feldern für jeden Sonderpunkt und Profilpunkt mehr als 13.000 Einzelwerte je Parameter und Jahr. Dies ermöglicht es, eine genaue beschreibende Statistik des Durchflußverhaltens an allen Profilen und der Strömungsdynamik im Oderästuar oder einzelnen Kompartimenten vorzunehmen. Die statistischen Parameter der Durchflußreihen sind in Tabelle 3 und Tabelle 4 angegeben; einige Verteilungsdichten sind in Abbildung 6 dargestellt.

Zusammen mit den in Tabelle 2 mitgeteilten Dimensionierungen der Profile, lassen sich aus den Verteilungen der Durchflüsse die Verteilungen der mittleren Stromgeschwindigkeiten und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten errechnen.

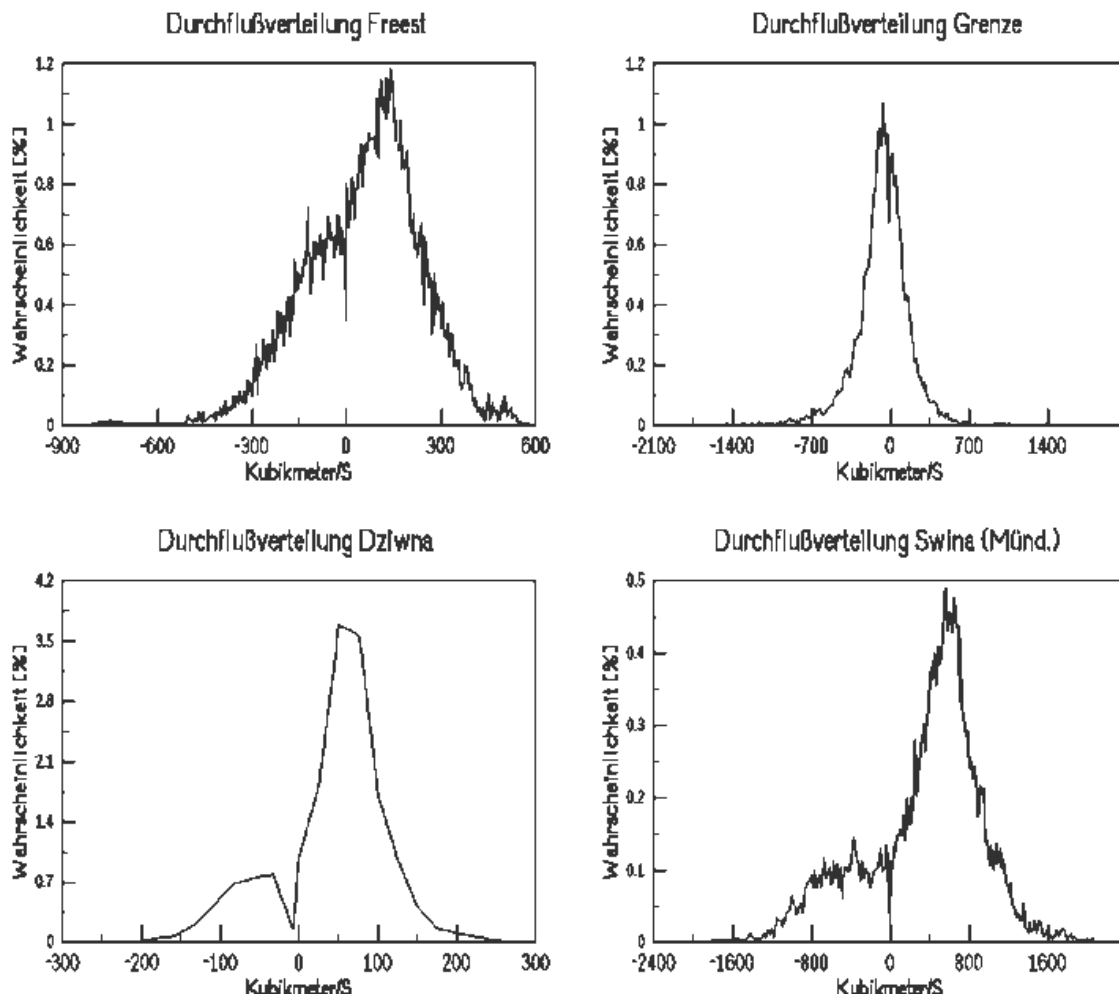


Abbildung 6: Exemplarisches Verteilungsdichten von mit dem zweidimensionalen Modell simulierten Wasserdurchflüssen.

Die entsprechenden Aussagen für das gesamte Gebiet, einschließlich der transportierten Wassermengen sind in Tabelle 5 zusammengefaßt. Die zugehörigen Zeitreihen befinden sich in der GOAP-Datenbank. Daraus lassen sich natürlich die Bilanzen – auch zeitlich feiner aufgelöst - ermitteln.

Profilname	Referenz		Fläche [m <sup>2</sup> ]	Breite [m]	mittlere Tiefe [m]
	Quelle	Jahr			
VP_KOOS	MIELKE	1980	14.841	4.462	3,3
VP_OSTRAND	WWD	1968	49.400	11.000	4,5
RANDSCHWELLE	WWD	1968	28.600	7.730	3,7
VP_RUDEN	GOAP	1994	6.880	2.060	3,3
HP_FREEST	GOAP	1994	3.980	3.220	1,2
HP_WOLG	GOAP	1994	1.870	440	4,3
VP_ACHT	GOAP	1994	9.160	2.920	3,1
HP_ZECH	GOAP	1994	1.740	620	2,8
VP_GREN	GOAP	1994	30.400	9.700	3,1

HP_OSWIN	GOAP	1994	3.520	280	2,6
HP_DZIW	GOAP	1994	1.640	1.130	1,5

Tabelle 2: Fläche, Breite und mittlere Tiefe ausgewählter Profile im Untersuchungsgebiet.

Das zweidimensionale Modell gibt Felder der vertikal gemittelten Berechnungsgrößen viermal am Tag aus, was hochgerechnet 1.460 Felder je Parameter und Jahr ergibt. Zur schnelleren Auswahl interessierender Ereignisse oder Zeiträume sind für die untersuchten Jahre je Parameter die jeweils 28 Felder einer Woche gestapelt und für 1994/95 graphisch im GIF-Format auf Datenträger bereitgestellt worden (GOAP-Datenbank). Die entsprechenden Ergebnisse für das Jahr 1993/1994 sind ausführlich dokumentiert als Papiausdrucke im Projektbüro einsehbar.

Die Integration der Durchflußreihen liefert die Transporte der meteorologischen Jahre 1993/1994 und 1994/95. Für das Oderhaff ergibt sich beispielhaft die folgende Tabelle 5.

Die Abbildung 7 zeigt neben der Lage und Auflösung des Gitters auch ein besonders interessantes Beispiel für das mittlere Salzfeld der Woche vom 11.4.95 bis 17.4.95. Hier sind einige für das Untersuchungsgebiet typische Situationen über lange Zeit so stabil, daß sie sowohl in dem Wochenmittel als auch in den Mitteln der folgenden zwei Wochen noch deutlich erkennbar sind. Es sind dies die ausgeprägte Fahne (Plume) des Oderaustroms vor der Swinemündung sowie die in den strömungsarmen Gebieten des Achterwassers und in den am Kleinen Haff gelegenen Wiecken stehenden Wasserkörper. Deutlich ist auch der Bereich salzhaltigen Wassers im nördlichen Greifswalder Bodden um die Insel Vilm erkennbar.

Die Vielfalt des Datensatzes an zweidimensionalen Modellergebnissen kann in Form derartiger Abbildungen nicht erschlossen werden. Die übersichtlichste und lehrreichste Methode der Präsentation dieser Daten besteht in der Betrachtung der zeitlichen Entwicklung von Strömungs- und Verteilungsmustern anhand von Computeranimationen. Hierzu können die gespeicherten Felder aufbereitet und - zusammen mit der Steuerung und mit meteorologischen Daten - zu einem Videoclip montiert werden. Ein solches Beispiel wurde für einen Teilbereich des Greifswalder Boddens hergestellt. Weitere Arbeiten in dieser Richtung sind im Kapitel 7.3 ausgeführt und vorgeschlagen.

Profilname	Bemerkung	Richtung	rH	E	MAX	S
HP_OSWI	Swinaauslauf zur Pomm. Bucht	Nord → Süd	23,97	513	1.987	5,93
HP_OSWI		Süd → Nord	76,03	624	2.084	3,29
HP_DZIW	Dziwnaauslauf zur Pomm. Bucht	Nord → Süd	18,91	58	282	0,81
HP_DZIW		Süd → Nord	81,09	82	277	0,40
HP_LASS	Lassan/Quilitz (Pfahl2)	Nord → Süd	27,55	71	276	0,83
HP_LASS		Süd → Nord	72,45	111	438	0,66
HP_KRUM	Krumminer Wieck	Nord → Süd	33,43	117	620	1,24
HP_KRUM		Süd → Nord	66,57	149	496	0,96
HP_FREE	Freest	Nord → Süd	34,29	137	825	1,55
HP_FREE		Süd → Nord	65,71	163	582	1,14
HP_VIETW	horiz. Trennung der beiden	Nord → Süd	65,91	367	1.895	2,95
HP_VIETW	westl. Kompartimente Vietinghoff	Süd → Nord	34,09	261	1.499	3,08
HP_VIETO1	horiz. Trennung der beiden	Nord → Süd	66,27	439	3.554	3,34
HP_VIETO1	östl. Kompartimente Vietinghoff	Süd → Nord	33,73	377	3.880	5,21

Tabelle 3: Beschreibende Statistik ausgewählter Horizontalprofile, 1994/1995 (rH - relative Häufigkeit [%], E - Erwartungswert [m3/s], AX - Maximum [m3/s], S - Standardabweichung

Profilname	Bemerkung	Richtung	rH	E	MAX	S
VP_KOOS	Strelasund bei Insel Koos	Ost → West	70,62	629	2.925	4,40
VP_KOOS		West → Ost	29,38	434	1.996	4,84
VP_GREN	Deutsch- Polnische Grenze	Ost → West	61,07	193	1.728	2,23
VP_GREN		West → Ost	29,38	142	1.690	1,93
VP_ACHT	Achterwasser	Ost → West	55,10	42	297	0,38
VP_ACHT		West → Ost	44,90	523	42	0,61
VP_OSTR	Ostrand des Greifsw. Bodden	Ost → West	58,49	1260	8.262	12,90
VP_OSTR		West → Ost	41,51	1001	8.461	12,50

Tabelle 4: Beschreibende Statistik ausgewählter Vertikalprofile, 1994/1995 (rH - relative Häufigkeit [%], E - Erwartungswert [m<sup>3</sup>/s], MAX - Maximum [m<sup>3</sup>/s], S - Standardabweichung).

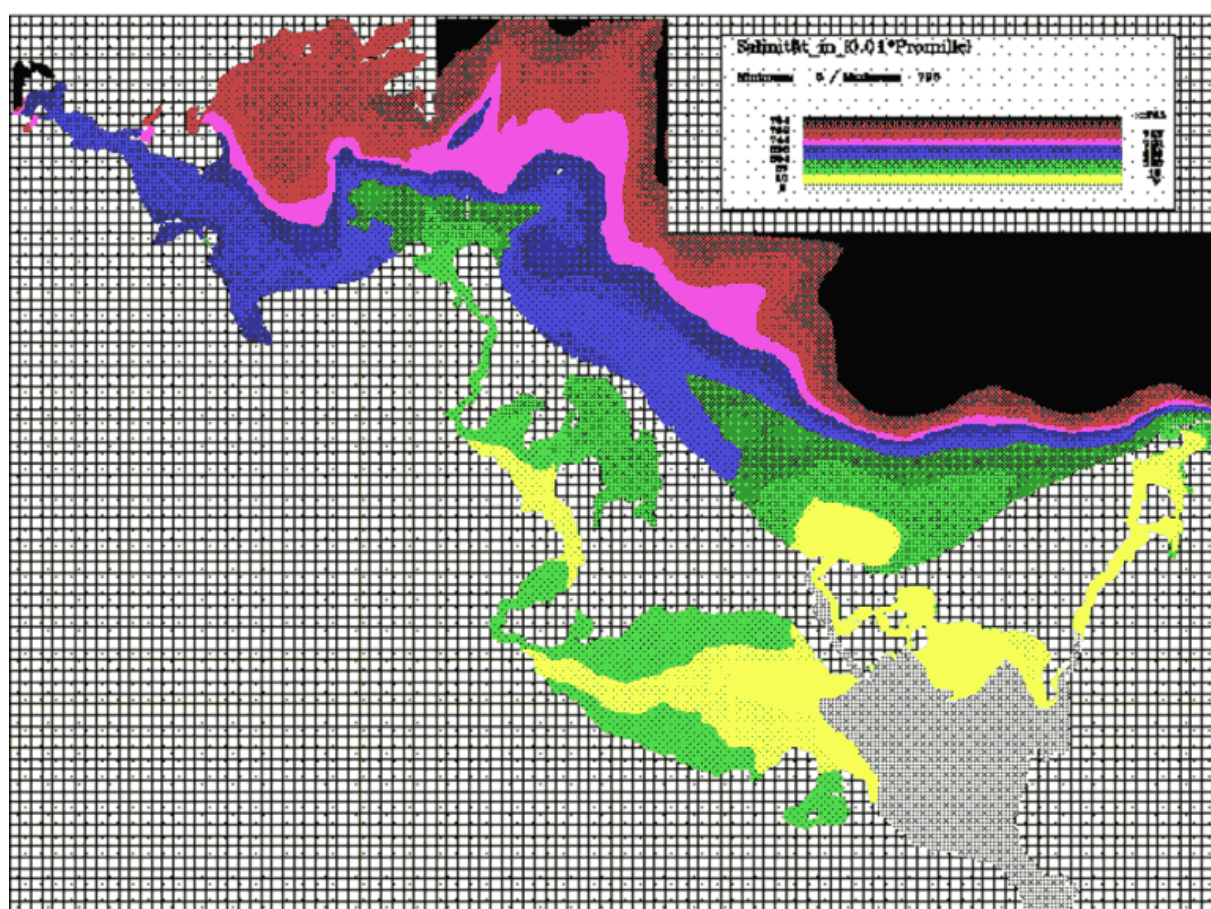


Abbildung 7: Beispiel einer mit dem zweidimensionalen Modell simulierten Salzgehaltsverteilung.

Profilname		1993/1994		1994/1995	
		km <sup>3</sup>	%	km <sup>3</sup>	%
HP_ODER	Oderabfluß → Großes Haff	17,3044	100,00	15,1249	100,00
HP_OSWI	Swine → Ostsee	12,4416	71,90	11,3928	75,32
VP_GREN	Großes Haff → Kleines Haff	2,7799	16,00	1,9267	12,74
HP_DZIW	Dziwna → Ostsee	2,0958	12,10	1,8054	11,94

Tabelle 5: Über ein Jahr integrierte Verteilung des Oderabflusses in Kubikkilometern.



## 6.2 Zusammenfassung der Ergebnisse der dreidimensionalen Simulationen

Mit den dreidimensionalen Modellen wurden prinzipielle Berechnungen durchgeführt. Diese Arbeiten beinhalteten insbesondere

- Prinzipstudien zur windgetriebenen Zirkulation und der sich entwickelnden Dynamik;
- Evaluierung von Ein- und Ausstromereignissen und zum Wasseraustausch;
- Bewertungen zur sensiblen Balance zwischen baroklinem Druckgradient, Oberwasserzufluß und Reibung bei ruhigen Wetterlagen;
- Untersuchungen zur Sensitivität und Naturähnlichkeit der Modelle;
- Plausibilisierung und Verifikation;
- Untersuchungen zur Variabilität von Zirkulation und Transport als Grundlage zum Verständnis der dynamischen Prozesse im Untersuchungsgebiet sowie zur Definition eines Ensembles repräsentativer Szenarien für Vergleichsrechnungen mit zweidimensionalen Modellansätzen (siehe hierzu Abschnitt 6.3),
- konzeptionelle Arbeiten und Versuche zu Möglichkeiten und Methoden im Hinblick auf routinemäßige und operationelle Anwendungen (siehe hierzu Abschnitt 7.2), insbesondere zur Verbesserung von Rand-, Anfangs- und Anfachungsbedingungen;
- Kopplung mit größerskaligen Modellen;
- Entwicklung einer integrativen Modellkonzeption ("Kaskadierung").

Die Modelle werden mit unterschiedlicher vertikaler Auflösung und mit verschiedenen Rand- und Anfangsbedingungen sowie mit unterschiedlichem Forcing betrieben. Die Methoden, Modelle und Ergebnisse sowie deren Auswertungen wurden in GOAP-Berichten dokumentiert und liegen in digitaler Form teilweise als numerische Werte, teilweise als archivierte Darstellungen vor. Eine umfassende Beschreibung würde den Rahmen dieses Berichtes sprengen, so daß an dieser Stelle nur einige Kernergebnisse zusammengefaßt und die wichtigsten Folgerungen (siehe hierzu auch Abschnitt 7.2) dargestellt werden können.

Die erzielten Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Sowohl das horizontal fein aufgelöste als auch das gröber gerasterte Modell produzieren realitätsnahe und naturähnliche Ergebnisse. Dies gilt für das Responseverhalten und die simulierten Verteilungen von Wasserstand, Strömung sowie für Eindringen, Vermischung und Rezirkulation von Ostsee- und Brackwasser. Kurz- und längerperiodische Schwankungen von Wasserständen an den seewärtigen Rändern propagieren naturnah in die Untersuchungsgebiete und werden dort naturähnlich gedämpft. Dasselbe gilt sinngemäß für horizontale und vertikale Schwankungen von Temperatur und Salzgehalt an den seeseitigen Rändern sowie für den Oberwasserzufluß. Die durch das lokale Windfeld in den Untersuchungsgebieten erzeugten Eigenschwingungen entsprechen in Frequenz, Amplitude und Dämpfungsverhalten den beobachteten Prozessen.

- Das gröber aufgelöste Modell kann zwar in den engen Kanälen, Passagen und Durchlässen von Peene, Swine und Dziwna die dortigen Zirkulationsmuster nicht horizontal auflösen; die Modellapproximationen stellen jedoch weitestgehend sicher, daß die Transporte und die aus- und einströmenden Wasservolumina sowie die Charakteristika (Salzgehalt, Temperatur, Vertikalprofile) der Wassermassen erhalten bleiben. Dasselbe gilt sinngemäß für die schematisiert approximierten Gebiete stromauf ab Stettin sowie für die Nebenflüsse, für das freie Propagieren und Dämpfen von Wasserstandsänderungen und Eigenschwingungen im Oderhaff sowie für Transport und Ausbreitung von Oberwasserzuflüssen.

Zur Untersuchung der Naturähnlichkeit des horizontal 100 m auflösenden Modells wurde ein Zeitraum aus der GOAP Sommer-Synopta'94 vom 23. bis 26. Juni 1994 mit realitätsnahen Rand- und Anfangsbedingungen sowie einer aus Messungen abgeleiteten Windanfischung (Forcing) durchgeführt. Für diesen Zeitraum lagen ausreichende und synoptische Informationen zur Initialisierung einer Nachhersage und zum Vergleich der Ergebnisse mit Meßdaten vor. Die Anfangsbedingungen wurden aus einer zuvor durchgeführten Simulation mit dem zweidimensionalen Modell des gesamten Untersuchungsgebietes extrahiert. An den seeseitigen Rändern wurde das Modell mit aus Pegelmessungen der Stationen Saßnitz, Koserow, Stralsund, Dziwnow sowie dem installierten Meßpegel an der Swinemündung) entlang der Ränder konsistent interpolierten Wasserständen angetrieben. An den nördlichen und östlichen Modellrändern in der westlichen Pommerschen Bucht wurden – mangels konsistenter horizontal und vertikal hinreichend aufgelöster instationärer Daten - Temperatur und Salzgehalt über den Simulationszeitraum konstant gehalten. Am offenen Rand vor der Swinemündung wurden aus den Verankerungsmessungen instationäre Vertikalprofile von Temperatur und Salzgehalt ermittelt und als instationäre und vertikal inhomogene Randbedingung vorgegeben. An der Dziwnamündung wurden dieselben Randbedingungen angesetzt, da die dort von einer anderen Arbeitsgruppe ausgebrachten Meßinstrumente und der Pegel des polnischen Meßnetzes ausgefallen waren. Die Abflüsse der Oder (Gosdowice), Peene (Anklam) und Ücker wurden aus den vorhandenen Abflußmessungen ermittelt. Für den Antrieb des Modells wurde aus vorhandenen Windmessungen der Stationen Stralsund, Greifswald, Swinemünde und Ückermünde, soweit mit der geringen Datendichte möglich, ein über das Gebiet variables Windfeld erzeugt und als regional repräsentativer Antrieb angesetzt. Hiermit sind zwar bessere Approximationen des lokalen windbedingten Energieeintrags möglich; das hieraus resultierende Windfeld ist jedoch von den beobachteten und zu erwartenden Verhältnissen in der Natur (s.u.) lokal nach wie vor unzureichend aufgelöst.

Trotz der vertikal relativ groben Auflösung und der unzureichenden räumlichen Auflösung des Windfeldes konnte eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den ebenfalls im Vergleich zur horizontalen Modellauflösung in geringer Anzahl vorliegenden Naturmessungen erzielt werden. Die Wasserstände und damit die Wasservolumina im Greifswalder Bodden und im Haff wurden mit guter Genauigkeit reproduziert. Dies gilt insbesondere für den Wassertransport über den Piastowski-Kanal (s. Pegel Karsibor III an der haffseitigen Einfahrt zum Piastowski-Kanal). Dies ist sicherlich primär auf die gute Qualität der Randbedingungen (Wind-, Wasserstands-, Salzgehalts- und Temperaturmessungen bei Swinemünde) zurückzuführen.

Dies beweist jedoch auch, daß die Zirkulation und das Schwingungsverhalten des Oderhaffs vom Modell korrekt reproduziert werden und das Windfeld für den zentralen Bereich des Oderhaffs hinreichend repräsentativ ist. Hierfür stellt die Position Karsibor III einen kritischen Punkt dar, da sie zum einen in der Nähe von Schwingungsknoten barotroper

Eigenmodes der Längsschwingungen und an Schwingungsbäuchen der Querschwingungen liegt. Zum anderen implizieren stärkere Wasserstandsdifferenzen an dieser Position sofort starke Fehler in den Transporten und Bilanzen durch den Piastowski- und Swine-Kanal. Der Wasserstand am Peene-Knick (Pegel Karnin) zeigt, abgesehen von der Einschwingphase, naturähnlichen Verlauf, stellt sich jedoch nicht ganz so hoch wie beobachtet ein. Dies ist - wie vergleichende Untersuchungen mit anderen Nachhersagen beweisen - primär eine Folge räumlich unzureichend aufgelöster meteorologischer Antriebe vor und entlang des Peenestroms und im Kleinen Haff, welche sich stromauf entsprechend verstärken. Die systematischen Abweichungen am Pegel Ücker münde, insbesondere bei - wie ab etwa dem 24.6.94 vorherrschenden - auf- und ablandigen Winden, sind aus vorhergehenden vergleichenden Simulationen mit unterschiedlichem Windforcing in der hier ebenfalls auftretenden Größenordnung bekannt. Sie sind mit dort auftretender starker lokaler Variabilität des Windfeldes erklärbar. Für den Greifswalder Bodden gelten dieselben Argumente. Insbesondere bei nördlichen und südlichen Windrichtungen führen orographische Effekte (Abschattungen) und unterschiedliche Reibung über Land und Wasser zu erhöhter Inhomogenität im Windfeld. Die Wasserstände bei Thiessow werden sehr gut reproduziert. Peenemünde und Lauterbach zeigen weitgehend gute Übereinstimmung mit kleineren Abweichungen bei ablandigen, stärker abgeschatteten Windrichtungen. Die vor allem bei nördlichen und südlichen Windrichtungen auftretenden Abweichungen der Wasserstände in Greifswald sind durch die lokalen orographischen Verhältnisse und die Lage des Pegels an der Dänischen Wiek plausibel zu erklären. Die zeitlichen Verläufe der Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen sowie der Salzgehalte zeigen im Vergleich zu den vorhandenen Messungen naturähnlichen Verlauf. Für einen detaillierten Vergleich ist die gewählte vertikale Auflösung des Modells zu grob. Dies kann mittels vertikal höher auflösender Simulationen im Rahmen der Sensitivitätsanalysen sowie aus vorhergehenden Verifikationen anderer Zeiträume umfassend belegt werden.

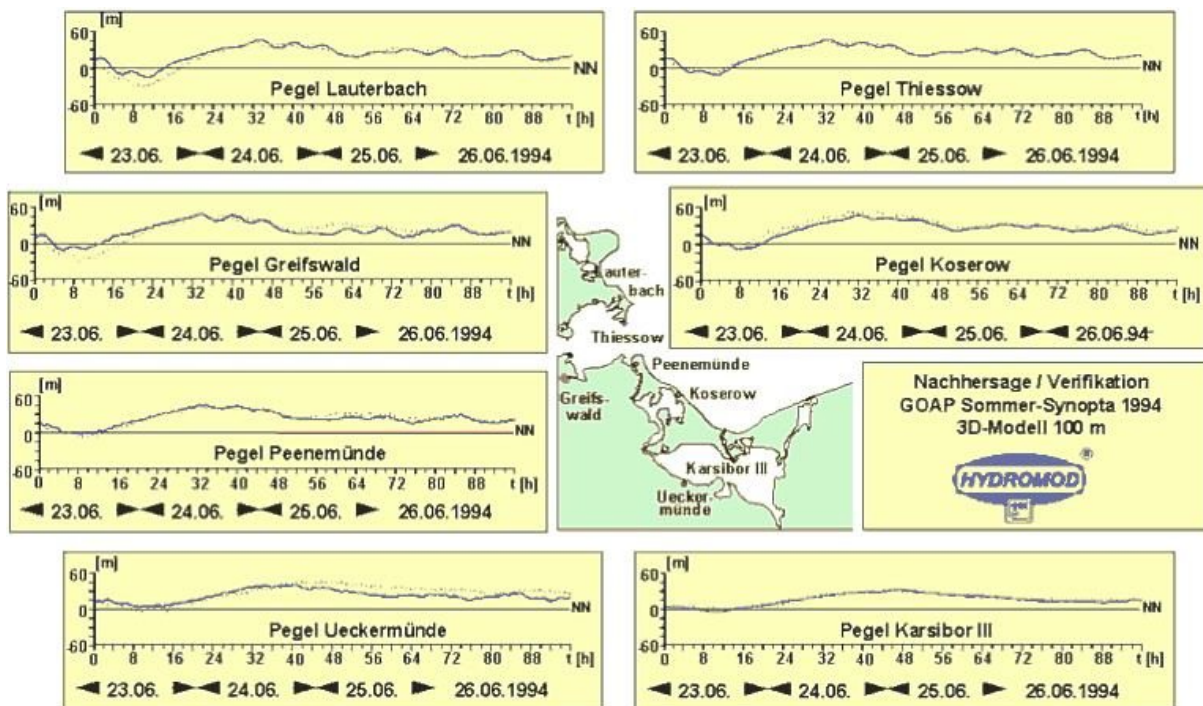


Abbildung 8: Vergleich gemessener und vom dreidimensionalen Modell des Greifswalder Boddens und des Oderhaffs berechneter Wasserstände während der GOAP Sommer-Synopta 1994.

Generell können die für GOAP angepaßten und verwendeten Modelle als plausibel und gut verifiziert eingestuft werden. Hiermit ist es möglich, Szenarien und Fallstudien mit hinreichend guter Genauigkeit zu simulieren und zwischen den einzelnen Simulationsläufen mit hoher Relativgenauigkeit zu vergleichen, Bilanzen abzuleiten oder mittels der Modellergebnisse weiterführende Systemsimulationen und Recherchen durchzuführen.

Die Modelle haben ebenfalls bewiesen, daß sie für den Routinebetrieb brauchbar sind und mit verhältnismäßig angepaßtem Aufwand an Infrastruktur und Betriebsmitteln (Workstations und Personalcomputer) betrieben werden können. Sie können auf diesen Plattformen ebenso im operationellen Betrieb zur kontinuierlichen Echtzeitsimulation ("Nowcasts") und Vorhersage eingesetzt werden. Damit sind sie ebenfalls für Überwachungs- und Vorhersagezwecke geeignet. Hierfür ist der Einsatz solcher Modelle in Küstengewässern mit derart hoher Variabilität und Heterogenität selbst einfacher behandelbarer physikalischer und hydrographischer Prozesse unabdingbar. Dies entspricht dem heutigen Stand der Technik, da alleine durch Routinemessungen mit vertretbarem Aufwand im Untersuchungsgebiet keine repräsentativen Aussagen getroffen werden können.

### 6.3 Vergleich der zwei- und dreidimensionalen Methodenansätze

Im Rahmen der Arbeiten wurden methodische und szenarienspezifische Untersuchungen zu den verwendeten zwei- und dreidimensionalen Vorgehensweisen bei der numerischen Modellierung durchgeführt. Aus Konsistenz- und Vergleichbarkeitsgründen wurden diese mit dem 250 Meter auflösenden dreidimensionalen Modell, welches auch im zweidimensionalen Modus betrieben werden kann, bearbeitet.

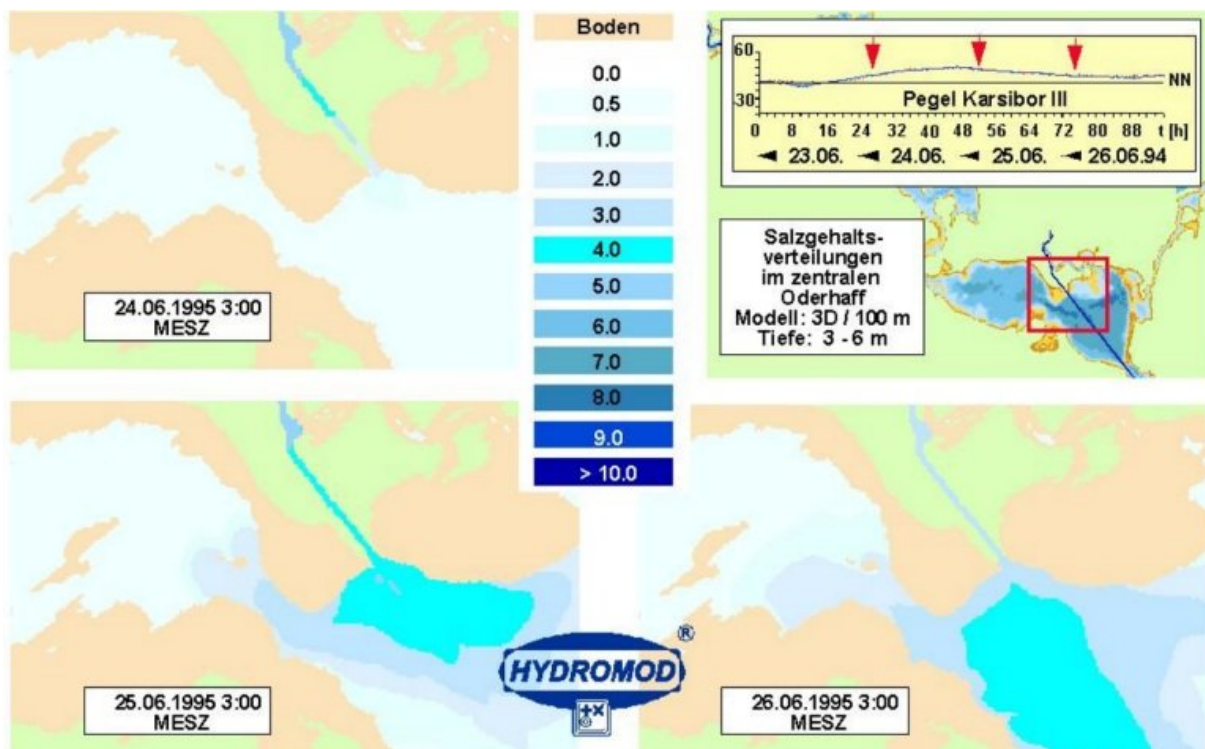


Abbildung 9: Mit dem dreidimensionalen Modell simulierte Salzgehaltsverteilungen im zentralen Oderhaff im Tiefenbereich von 3 bis 6 m während eines Einstromereignisses mit anschließender Bildung einer isolierten salzreichen Wassermasse (Linse) in tieferen Bereichen des Großen Haffs als beispielhafte Illustration eines dreidimensionalen Prozesses.

Aufgrund umfangreicher Untersuchungen bezüglich Zirkulation, Response und Sensitivität (siehe u.a. /3/, /4/, /5/ und /6/) wurde ein für die Untersuchungsziele als repräsentativ erachtetes Ensemble von Szenarien definiert. Dies erfolgte mittels entsprechender Randbedingungen und meteorologischer Antriebe. Diese wurden mit dem horizontal gröber auflösenden Modell des Oderhaffs simuliert und bezüglich der Aufgabenstellung ausgewertet. Die Vertikalauflösung des Modells betrug für die dreidimensionalen Simulationen konstant 0,5 m. Hierdurch stand, auch in den flacheren Bereichen, eine ausreichende Anzahl von Schichten zur Simulation der bei ruhigen Wetterlagen eventuell auch dort vorhandenen dreidimensionalen Strukturen und Schichtungen zur Verfügung. In dieser Konfiguration hatte das Modell mit ca. 17.000 von Wasser bedeckten Gitterpositionen an der Oberfläche insgesamt ca. 121.000 Gitterzellen. Für die vergleichenden, identisch angetriebenen zweidimensionalen Rechnungen wurde aus Konsistenzgründen exakt dasselbe Modell, jedoch ohne vertikale Diskriminierung verwendet.

Zusammengefaßt ergaben die Vergleiche folgende Ergebnisse:

- Wasserstände und starke Wasserstandsschwankungen werden vom zwei- und dreidimensionalen Modell in etwa identisch simuliert. Unterschiede sind im zeitlichen Responseverhalten und lokal erkennbar und durch die im zweidimensionalen Fall vereinfachte Approximation des windbedingten Impulseintrags an der Oberfläche und der Impulsdissipation am Boden erklärbar. Dadurch reagiert das zweidimensionale Modell generell träger auf kleinskalige und kurzzeitige Veränderungen des Windfeldes oder Schwankungen mit geringerer Amplitude an den seeseitigen Rändern. Hieraus kann, wie bereits im vorigen Abschnitt ausgeführt, geschlossen werden, daß reine Wassermassenbilanzen im längerzeitlichen Mittel mit einem zweidimensionalen Modell naturnah simuliert werden.
- Signifikante Unterschiede ergeben sich naturgemäß für winderzeugte Strömungen und Zirkulationsmuster. Dies betrifft sowohl Strömungsverteilungen (Profile) in der Vertikalen, welche zweidimensional bzw. tiefenintegriert nicht reproduziert werden können, als auch die Intensität und Richtung horizontaler Rezirkulationsmuster in flacheren Gebieten. Ebenso werden dichtebedingte Prozesse und hierdurch induzierte barokline Strömungsanteile zweidimensional nicht oder nur sehr unzureichend erfaßt. Dies kann insbesondere im nördlichen Peenestrom, in der Dziwnamündung und vor allem im Kanalsystem der Swine und dem nördlichen Oderhaff festgestellt werden. Die zuletzt aufgeführten Gebiete sind, wie auch aus den Tabellen im vorigen Abschnitt ersichtlich, für den Wasseraustausch des Oderhaffs sowie zwischen Großem und Kleinem Haff von primärer Bedeutung. Eine Quantifizierung und damit Ableiten systematischer Korrekturen ist angesichts der Variabilität von Zirkulationsmustern und Transportcharakteristika nicht möglich. So kann bei ruhigen Wetterlagen in der Swine in tieferen Bereichen Ostseewasser einströmen und Oderwasser in Oberflächennähe ausströmen. Solche zweigeschichteten Strömungen treten auch häufig in der tieferen Verbindung zwischen Großem und Kleinen Haff auf. Ein zweidimensionales Modell zeigt in diesen Fällen keine oder stark reduzierte Strömungsgeschwindigkeiten und Wassertransporte, während im dreidimensionalen Fall eine intensive Zirkulation auftritt, wie sie auch in der Natur vielfach beobachtet wird.
- Aus den oben genannten Gründen sind Betrachtungen zur Wassermassencharakteristik sowie zu Transporten von Wasserinhaltsstoffen aller Art oder gar deren Bilanzierung mit einem zweidimensionalen Modell im GOAP Untersuchungsgebiet nur sehr

eingeschränkt möglich. In situ werden vertikal wie horizontal starke Heterogenitäten selbst in der Verteilung konservativer Wasserinhaltsstoffe festgestellt. Hierunter fallen z.B. Linsen salzreicheren Wassers mit langer Verweilzeit in Bodennähe, welche aufgrund ihres Dichtegradienten nur gering mit den umgebenden Wassermassen wechselwirken bzw. sich damit vermischen können und entsprechend geringe Sauerstoffgehalte und gegenüber der Umgebung stark veränderte biogeochemische Charakteristika aufweisen. Eine allgemein auch nur annähernd gültige Korrektur oder Parametrisierung dieser Prozesse in einem zweidimensionalen Modell ist, vor allem wegen der starken lokalen Unterschiede, ebenfalls nicht möglich.

## **7. Zusammenfassung der Erfahrungen aus GOAP**

In den nachfolgenden Abschnitten sind die im Rahmen der Feldarbeiten, Datenauswertungen und Simulationsrechnungen im GOAP-Projekt von den Verfassern gewonnenen Erfahrungen zusammengefaßt. Diese mögen den einen oder anderen nützlichen Hinweis auf zukünftige methodische oder Ansätze in Forschung und Monitoring enthalten. Weiterhin sind hier Möglichkeiten für weiterführende Arbeiten reflektiert.

### **7.1 Hydro-meteorologische Messungen und Meßkampagnen**

Angesichts der hohen zeitlichen Variabilität und starken Inhomogenität hydrographischer Parameter im Untersuchungsgebiet können Messungen notwendigerweise nur den Charakter von Stichproben haben. Dies gilt vor allem für die ausgedehnten Gebiete des Haffs und des Greifswalder Boddens.

Für Indikationen zu Transportprozessen und Austauschvorgängen sind wichtige Positionen

- Im Greifswalder Bodden sind dies geeignete Positionen im Strelasund, entlang der Boddenrandschwelle und im Rudenstrom, wobei hier das Strömungsfeld über die gesamte Breite mit vertretbarem Aufwand nur schwer zu erfassen ist.
- Im Oderhaff ist dies vor allem der tiefe Durchlaß zwischen Großem und Kleinem Haff (in etwa bei der Grenztonne), wo wichtige Indikationen über Zirkulation und Schichtung gewonnen werden können. Eine zentrale Rolle kommt dem Pegel in Karsibor zu, da über die dortigen Wasserstandsregistrierungen Hinweise auf das Zirkulationsregime des Haffs und zum maßgeblichen Anteil des Wasseraustausches mit der Ostsee erhalten werden können.

Andererseits bietet das Oderhaff - aufgrund seiner Morphometrie und Konfiguration - nahezu ideale Bedingungen zur messwertgestützten Bilanzierung. Bei bekanntem Abfluß der Oder und Indikationen zur Variabilität quer zur Stromrichtung können an geeigneten, von lokalen Ein- und Ausstromereignissen im unmittelbaren Mündungsbereich abgeschirmten Positionen in der Peene, Swine und Dziwna aufgrund von Messungen verlässliche Bilanzierungen durchgeführt werden. Hierfür geeignete Positionen sind

- in der Peene nördlich des Achterwassers,
- in der Swine nördlich der Verzweigung in Piastowski Kanal und Alte Swine
- und in der mittleren Dziwna.

Hierbei muß jedoch den meßtechnischen und operativen Schwierigkeiten Rechnung getragen werden. Insbesondere in der Swine treten teilweise starke Strömungen auf, wobei vielfach Treibsel aller Art mitgeführt werden. Hinzukommt die Schifffahrt, welche durch Messungen nicht behindert werden darf und die hierdurch induzierten Wellen und Strömungen, welche Messungen - zumindest zeitweise - erheblich stören oder verfälschen können.

Schwierigkeiten bereitet die Extrapolation des Oderabflusses, welcher routinemäßig u.a. in Gosdowide circa 100 km stromauf von Stettin gemessen wird. Dies liegt an Retardierungs- und Stauwirkungen im Oderbruch, an weit stromauf reichenden Einflüssen von Wasserstandsänderungen und Oszillationen im Oderhaff und an diversen Strombauten, deren

hydraulische Parameter und Steuerung nicht oder nur unzureichend bekannt sind. Verbesserungen könnten hier mit detaillierten Modellstudien erfolgen, sofern hierfür ein geeignetes Modell sowie eine detaillierte Daten- und Informationsbasis zur Verfügung stehen.

Für Modellverifikationen, Fallstudienrechnungen und Betrachtungen zur Wasserqualität ist weiterhin die Erfassung des aktuellen Massenfeldes im Oderhaff erforderlich. Bezüglich der Wassertemperatur ergab die von den Verfassern demonstrativ angewendete Assimilation von Satellitenbildern eine praktikable Lösung. Diese Ansätze können durch rekursive Einbeziehung von mit Modellen ermittelten und von Messungen gestützten Daten und Informationen zur thermischen Schichtung sukzessive verbessert werden. Schwieriger gestaltet sich die Ermittlung eines hinreichend genau aufgelösten Salzgehaltsfeldes. Die im Oderhaff angewendeten Methoden zur quasi-synoptischen Ermittlung des Massenfeldes mittels CTD-Profilen sind im Einzelfalle machbar. Sie stellen jedoch das Maximum an Messungen dar, welche mit vertretbarem Aufwand, innerhalb hierfür relevanter Zeitskalen von maximal etwa einem halben Tag, durchführbar sind. Im Greifswalder Bodden und den küstennahen Gebieten der Pommerschen Bucht ist eine quasi-synoptische Vermessung des Salzgehaltsfeldes mit vertretbarem Aufwand nur im Einzelfalle durchführbar.

Ein weiterer wichtiger Parameter stellt das lokale Windfeld dar. Mangels relevanter Tideneinflüsse sind wesentliche Anteile an Zirkulations- und Transportprozessen durch das lokale Windfeld verursacht. Dieses ist im Untersuchungsgebiet räumlich und zeitlich sehr variabel und kann meßtechnisch von den wenigen vorhandenen, an Land installierten meteorologischen Dauermeßstationen nicht erfaßt und auf die erforderlichen Raumskalen interpoliert werden. Hinzukommen Änderungen von Windstärke und Windrichtung über See (siehe hierzu auch Abschnitt 6.2). Als Alternative bieten sich Modellrechnungen - wie sie in GOAP auch von der GKSS mit hohem Aufwand durchgeführt wurden - an. Für die Ermittlung naturnaher Windfelder im Routinebetrieb könnten daher Verfahren entwickelt werden, welche mit vereinfachten, gegebenenfalls gebietstypisch parametrisierte bzw. kalibrierte Modelle realistische Windverteilungen liefern.

Die ebenfalls von den Verfassern durchgeführten Arbeiten zur konsistenten Integration eines Großteils der im Vorhaben ermittelten hydrographischen Daten ergaben teilweise erhebliche Inkonsistenzen bei der Datenerfassung sowohl durch verschiedene Arbeitsgruppen als auch mit unterschiedlichen Meßsystemen. Weitere Inkonsistenzen bestehen in Kalibrierung und Prozessierung der Daten. Hier besteht noch erhebliches Optimierungspotential, welches jedoch eher informationstechnologischer Natur ist und keinen oder nur geringen Forschungscharakter hat (siehe hierzu auch Kapitel 7.3).

## **7.2 Numerische Modellierung**

Die von den Verfassern im GOAP-Projekt angepaßten und angewendeten numerischen Modelle zur Simulation hydro-physikalischer Parameter konnten sowohl langperiodische Prozesse als auch Ereignisse und Episoden von kürzerer Dauer mit guter Genauigkeit reproduzieren. Die gewonnenen Ergebnisse wurden von anderen Partnern im Verbundvorhaben zur Bearbeitung hydro-biogeochemischer Fragestellungen und zur Interpretation ihrer Daten und Ergebnisse herangezogen. Die produzierten, zeitlich und räumlich hochaufgelösten, Ergebnisse sind eine unverzichtbare Grundlageninformation für hydrodynamisch vereinfachte, jedoch komplexere Prozesse behandelnde Modelle, wie sie u.a. in der Ökosystemsimulation heutzutage zunehmend verwendet werden. Dies wurde im GOAP-Vorhaben ebenfalls durchgeführt. Hierzu wurden konsistent integrierte Ergebnisse des zweidimensionalen Modells als Randwerte und hydrodynamische Grundlageninformation für



die von einer Arbeitsgruppe der Universität Rostock verwendeten Ökosystem-Kompartimentmodelle zur Verfügung gestellt.

Zur Simulation der hydro-physikalischen Prozesse im Untersuchungsgebiet sind räumliche und zeitliche Auflösungen im Bereich von 100 m und ca. 5 Minuten erforderlich. Die großflächigen Gebiete Oderhaff und Greifswalder Bodden können auch räumlich etwas gröber aufgelöst werden; dies erfordert jedoch gebietstypische Parametrisierungen in engeren Bereichen der Mündungsarme und Fließgewässer.

Die Verifikation von derart umfangreichen Modellsystemen mit klassischen Methoden der Nachhersage eines Zeitraumes, für welchen synoptisch Rand-, Anfangs- und Anfangsbedingungen sowie Vergleichsmessungen im simulierten Gebiet vorliegen müssen, stellt ein erhebliches Problem dar. Selbst mit den umfangreichen und mit erheblichem Aufwand gewonnenen Datensätzen der GOAP-Synopten, können Daten- und Informationslücken teilweise nicht geschlossen werden. Dies betrifft insbesondere das lokale Windfeld und die Anfangsverteilung des Massenfeldes sowie Genauigkeitsprobleme und Informationsdefizite bei den erforderlichen Randbedingungen, insbesondere die zeitlichen Verläufe von Wasserstand, Temperatur und Salzgehalt entlang den seeseitigen Rändern. Vor allem bei ruhigen Wetterlagen ist es weiterhin schwierig, im erforderlichen Genauigkeitsbereich konsistent nivellierte Pegelregistrierungen zu erhalten. In diesen Phasen können Unterschiede von wenigen Zentimetern zwischen zwei Randpegeln erheblichen Einfluß auf Zirkulation und Austauschverhalten haben. Exemplarisch wurden hierzu in GOAP Überlegungen angestellt, wie sich die genannten Informationen verbessern lassen. Diese beinhalteten unter anderem Untersuchungen und exemplarische Anwendungen zur

- Möglichkeit der Anbindung an größerskalige Simulationsmodelle der Ostsee - wie dem operationellen Vorhersagemodell des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie - zur Verbesserung von Randwerten und Anfangsfeldern durch geeignete Verfahren zur Übernahme und Assimilation von Modellergebnissen;
- Nutzung von Fernerkundungsmethoden und Satellitenaufnahmen zur Vervollständigung topographischer Informationen, Ableitung von Anfangsbedingungen und Vergleichsfeldern der Wassertemperatur;
- Ableitung von ergänzenden Windinformationen sowie von Strömungs- und Transportmustern aus Radardaten zur qualitativen Modellverifikation
- sowie die bereits im vorigen Abschnitt genannten Überlegungen zu verbesserten Windfeldern.

Die in GOAP durchgeführten Überlegungen und ersten Anwendungen ergaben zu diesen Themen vielversprechende Hinweise für weiterführende Ansätze und Entwicklungen und deren Machbarkeit.

Da sich einerseits dreidimensionale hochauflösende Modelle wegen ihres hohen Rechenaufwandes routinemäßig nicht - oder noch nicht - für langperiodische Simulationen einsetzen lassen, andererseits eine Vielzahl von Prozessen im Untersuchungsgebiet nur mit erheblichen Genauigkeitsabstrichen zweidimensional simuliert werden können, wurde von den Verfassern ein Anwendungs- und Kaskadierungskonzept entwickelt. Dieses basiert auf einer zielspezifisch orientierten kombinierten Anwendung des zweidimensionalen Modells für längerperiodische Simulationen und einer konsistenten Übergabe der benötigten Rand- und

Anfangswerte an dreidimensionale Modelle zur Behandlung von Prozessen und Fragestellungen, welche zeitlich und räumlich höher aufgelöst oder tiefen-diskret simuliert werden müssen.

### **7.3 Weiterführende Arbeiten**

Mit Abschluß des GOAP-Vorhabens steht eine Modellfamilie einschließlich einer umfangreichen und modell-konsistent aufbereiteten Datenbasis zur Verfügung, welche für eine Vielzahl von Problemstellungen eingesetzt werden kann. Die Einsatzmöglichkeiten beschränken sich nicht nur auf grundlegende oder angewendete Themen aus der Forschung, sondern beinhalten verschiedenste Anwendungen in der wasserwirtschaftlichen Praxis sowie für Regional- und Raumplanung, zur Ermittlung von Grundlageninformationen und Prognosen für wasserbauliche Maßnahmen und deren Einfluß auf das Ökosystem, für angewandte Aspekte im marinen Umwelt- und Gewässerschutz sowie für den Routineeinsatz im Monitoring und für das Küsten- und Gewässermanagement. Letzteres erfordert die Einbindung der GOAP-Modellfamilie in operationelle Modellsysteme, deren prinzipielle Machbarkeit im Rahmen von Vorüberlegungen demonstriert wurde.

Kurzfristige Verbesserungen und Optimierungen der Modelle sind weniger im Verfahrens- und Methodenbereich zu erwarten, sondern können vielmehr durch konsequentes Weiterverfolgen der im Abschnitt 7.2 aufgeführten Ansätze zur Verbesserung der Eingangsinformationen erzielt werden. Erweiterungsmöglichkeiten bestehen in der Einbindung von Verfahren zur Behandlung weiterer Prozesse, wie Sediment- und Schwebstofftransport sowie von Welleneinflüssen. Dies wird derzeit in einer von EMAU-IfG und dem Institut für Meereskunde betreuten Promotionsarbeit grundlagenforschend untersucht. Weiterhin könnten wasserqualitätsrelevante Parameter behandelt werden, wofür bei den Verfassern bereits wesentliche Verfahren zur Verfügung stehen. Erhebliches Optimierungspotential besteht im informationstechnologischen Sektor durch verbesserte und anwenderfreundlichere Verfahren zum Betrieb der Modelle sowie zur Auswertung und Darstellung der Ergebnisse.

Im GOAP-Projekt wurden erhebliche Mengen von numerischen Daten, Meta-Informationen und Simulationsergebnisse gewonnen. Diese sind jedoch teilweise in der Datenbank archiviert und stehen nur einem limitierten oder spezialisierten Anwender- und Interessentenkreis zur Verfügung. Erfahrungsgemäß ist ein Großteil der Informationen für eine längerfristige Nutzung durch Dritte nicht, noch nicht oder bereits nicht mehr zugänglich. Ebenso sollten u.E. einige Datensätze einer abschließenden Konsistenzprüfung unterzogen und ein Teil der Daten in einheitliche Einheiten umgerechnet sowie bezüglich Erhebungs- und Auswertemethoden dokumentiert werden. Eine breite und langfristige Nutzung der in GOAP gewonnenen Ergebnisse durch einen erweiterten Interessenten- und potentiellen Anwenderkreis ist nur möglich, wenn diese in einfacher Art und Weise - unterstützt von einfach zu bedienenden Softwaretools auf verbreiteten Plattformen - auch für weniger oder nicht DV-spezialisierte Personen und Institutionen verfügbar und zugänglich gemacht werden können (siehe hierzu auch diesbezügliche Anmerkungen in Abschnitt 6.2). Hierzu sind bei den Verfassern umfangreiche Erfahrungen sowie Anwenderprogramme vorhanden, welche hierfür spezifisch angepaßt werden können. Von den Verfassern wird daher vorgeschlagen, die Daten, Simulationsergebnisse und Informationen aus GOAP in dieser Weise einem breiten Nutzerkreis im Rahmen eines "post-Projekt Daten- und Informationsmanagements" verfügbar zu machen und damit Ergebnisse aus der Grundlagenforschung anwendungsorientierter aufzubereiten und bereitzustellen.

## 8. Quellenverzeichnis

/1/ Al-Ahmad H. und R. Lampe, (1990): Beitrag zur Hydrographie des Achterwassers. *Wiss. Z. Ernst-Moritz-Arndt-Univ. Greifswald, Math.-nat. wiss. Reihe.* - Greifswald 39(1990)3. - S.42-45.

/2/ Buckmann K., Lampe R. und J. Krohn, J. (1990): Modellierung der Wasserdynamik im Greifswalder Bodden. - Unveröff. F/E-Bericht für das BMfT, Geesthacht 1990.

/3/ Nöhren I., Pfeiffer K.D., Duwe K.C., Jasiska E. and A. Walkowiak, (1990): Three-dimensional Modelling of Current and Transport Processes in the Odra Estuary. In: Gambolati et al. (eds.), *Computational Methods in Surface Hydrology, Comp. Mech. Pub.* (Southampton, Boston); Springer Verlag (Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo), pp. 107-112.

/4/ Nöhren I., Duwe K.C., Jasinska E., Pfeiffer K.D. and W. Robakiewicz (1992): Water exchange between the Baltic Sea and Szczecin Bay through the Swine Strait. In: *Hydrotechnical Transactions (Rozprawy Hydrotechniczne Polska Akademia Nauk)*, Vol. 55, Gdansk, Poland.

/5/ Pfeiffer K.D. and A. Walkowiak (1988): Relevant physical processes in the Odra estuary and aspects of their numerical modelling. In: *Proceedings of the 3rd German-Polish Seminar*, Technische Universität Hannover.

/6/ Pfeiffer K.D., Duwe K.C., and A. Fey (1993): Three-dimensional Modelling in the Oder Estuary. Achievements, Results and Open Questions. In: *Proceedings of the 1993 Annually Conference of the Oder Estuary*, Stettin.

/7/ Tremp D., Asmus M. und K. Eggert (1986): Die Anwendung eines eindimensionalen, hydrodynamisch-numerischen Modells im nördlichen Peenestrom. - *Wiss. Z. d. Wilhelm-Pieck-Univ. Rostock.* - Rostock Nat. Reihe, Heft 3, 35(1986).

/8/ Sündermann J., Duwe K.C., Nöhren I., Pfeiffer K.D. and Ye Longfei (1990): Strategy of current and transport modelling in different estuaries. In: Michaelis et al. (eds.), *Estuarine Water Quality Management (Monitoring, Modelling and Research)*, Coastal and Estuarine Studies, Springer Berlin-Heidelberg-New~York, pp. 25-34.

## **9. Danksagung**

Für die Möglichkeit in diesem Teilprojekt von GOAP mitarbeiten zu können, danken wir dem Leiter des Verbundvorhabens Herrn Prof. Dr. R. Lampe (Ernst-Moritz-Arndt Universität Greifswald, Institut für Geographie) sowie Herrn Dr. Irmisch und Herrn Dr. Harms (Projekträger BEO - Bereich Meeres- und Polarforschung des BMBF). Weiterhin gilt unser Dank den Mitarbeitern des Rechenzentrums der EMAU und Frau Buss sowie Herrn Dr. Kurbjeweit von der Koordinierungsstelle Boddenforschung sowie Herrn Dr. U. Lass vom Institut für Ostseeforschung. Für präzise Arbeit bei der Durchführung der Messungen und für die sehr gute Kooperation danken wir besonders Frau Dr. E. Jasinska (Institut für Wasserbauingenieurwesen der polnischen Akademie der Wissenschaften) in Danzig und ihrer Arbeitsgruppe. Für umfangreiche Unterstützung bei der Durchführung der Messungen danken wir besonders dem Hydrographischen Amt in Stettin und dem Maritimen Institut der Universität Stettin sowie weiteren, an dieser Stelle nicht näher genannten, Behörden und Kollegen aus Polen, ohne deren Unterstützung und Interesse an unseren Arbeiten die unkomplizierte und erfolgreiche Durchführung der Meßkampagnen in der Swine und im polnischen Teil des Oderhaffs nicht möglich gewesen wäre.

## Adressen der Autoren:

Klaus D. Pfeiffer  
Johannes Post  
Björn Hellmann  
Dr. Kurt Duwe  
Anneliese Fey

HYDROMOD  
Wissenschaftliche Beratung GbR  
Bahnhofstraße 52  
D - 22880 Wedel

Telefon: 04103 / 91 22 3 - 0  
Telefax: 04103 / 91 22 3 - 23

Email: [hydromod@hydromod.de](mailto:hydromod@hydromod.de)  
Internet : <http://www.hydromod.de>



Dr. Karsten Buckmann  
Ulf Gebhardt  
Alexander Weidauer

IFGDV  
Institut für Geodatenverarbeitung  
Feldstraße 37  
D - 17498 Hinrichshagen

Telefon: 03834 / 59 47 2 - 4  
Telefax: 03834 / 59 47 2 - 5

Email: [usergeo@gryps3.rz.uni-greifswald.de](mailto:usergeo@gryps3.rz.uni-greifswald.de)

