

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Heyer, Harro**

## **Zur Bedeutung mathematischer Modelle im Küstenwasserbau**

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102639>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Heyer, Harro (2003): Zur Bedeutung mathematischer Modelle im Küstenwasserbau. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 86. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 97-100.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Zur Bedeutung mathematischer Modelle im Küstenwasserbau

DR.-ING. HARRO HEYER, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, LEITER DER DIENSTSTELLE HAMBURG

Die Methoden und Verfahren, die zur Beurteilung wasserbaulicher Fragestellungen an den Seeschiffahrtsstraßen eingesetzt werden, haben sich im Zuge der Informatisierung aller Untersuchungsmethoden verändert. Numerische Modellverfahren, die noch in den 80er-Jahren im Rahmen von Forschungsprogrammen entwickelt wurden, sind in den 90ern zur Anwendungsreife gelangt. Die BAW hat mit dieser Entwicklung zeitnah mitgehalten. Bereits Ende der 80er-Jahre wurden Verfahren für numerische Küstenmodelle von Universitäten übernommen und weiterentwickelt. Aus den Aufgaben und Fragestellungen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung ergaben sich wachsende Anforderungen, denen die Verfahren im Rahmen sich anschließender Kooperationen mit nationalen und internationalen Instituten mit einem umfangreichen Anteil von Eigenleistungen angepasst wurden. Durch Beteiligung der BAW an den Umweltverträglichkeitsuntersuchungen und Planfeststellungsverfahren, welche für die großen Aus- und Neubauprojekte an den Seeschiffahrtsstraßen durchzuführen waren, haben Einvernehmensbehörden und auch Einwander weitere Anforderungen formuliert.

Wasserbauliche Maßnahmen an den Seeschiffahrtsstraßen, wie der Ausbau von Fahrrinnen für tiefere, breitere und auch längere Schiffe, das Errichten von Sturmflutsperrwerken, der Strombau zur Steuerung der Strömungen und Transporte von Feststoffen sowie der Baggerei und Baggergutunterbringung zur Sicherung des Schiffsverkehrs, greifen in das Naturgeschehen ein (siehe Bild 1). Diese Maßnahmen müssen fachwissenschaftlich untersucht und in ihren Wirkungen quantifiziert und bewertet werden. Da die Bewertung auf der Grundlage unterschiedlicher Betroffenheiten und Sichten zunehmend auch im öffentlichen und politischen Bereich erfolgte, wurden die an die mathematischen Modelle gestellten Anforderungen zwangsläufig Schritt für Schritt verstärkt.

Gerade die deutsche Küste ist geprägt durch weit ins Land reichende, an die Seeschifffahrt angepasste Flachland-Ästuar. Im Bereich dieser Flachland-Ästuar ist der Verkehrswasserbau eine sehr anspruchsvolle und zugleich außerordentlich interessante Aufgabe, weil die Elemente, Prozesse und Zustände des Wasserkörpers in ständiger Wechselwirkung mit den angrenzenden Sphären zu berücksichtigen ist. Die Komplexität der Aufgabe ergibt sich vor allem aus der hohen Variabilität der physikalischen Prozesse, da sich deterministische Gezeitenanteile (geprägt durch mehrere Ungleichheiten in den Tideerscheinungen) mit stochastischen wetter- und klimageprägten Anteilen vielfältig überlagern.

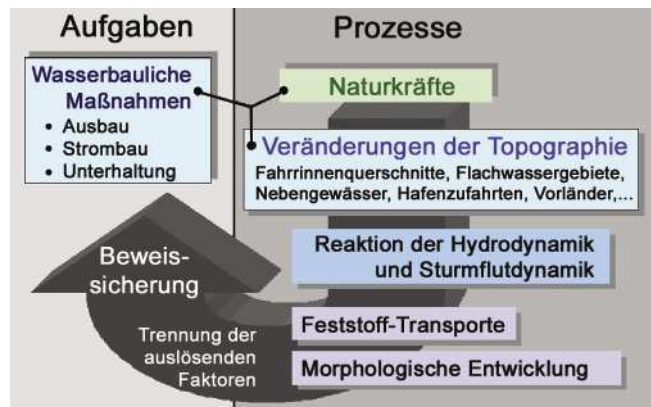


Bild 1: Aufgaben und Prozesse als Grundlage mathematischer Simulationsprojekte

Die Dynamik eines Ästuarsystems wird mit Gleichungen der Strömungs- und Bodenmechanik auf Grundlage der Naturgesetze beschrieben. Diese bilden den Grundstock der mathematischen Simulationsverfahren. Durch Anwendung eines Simulationsverfahrens auf ein bestimmtes Ästuar entsteht das Ästuarmodell, das je nach Untersuchungsziel aus mehreren Bausteinen (siehe Bild 2) zusammengesetzt wird.

Die BAW hat in den vergangenen Jahren viele mathematische Ästuarmodelle aufgebaut und betrieben. Mit steigenden Anforderungen der Fachwelt musste der Aufwand für die Berechnungen schrittweise erhöht werden. Dies ergab sich vor allem aus Verfeinerungen der Modelltopographien, räumlichen Erweiterungen der Untersuchungsgebiete und einer schrittweisen Vervollständigung der berücksichtigten physikalischen Prozesse.

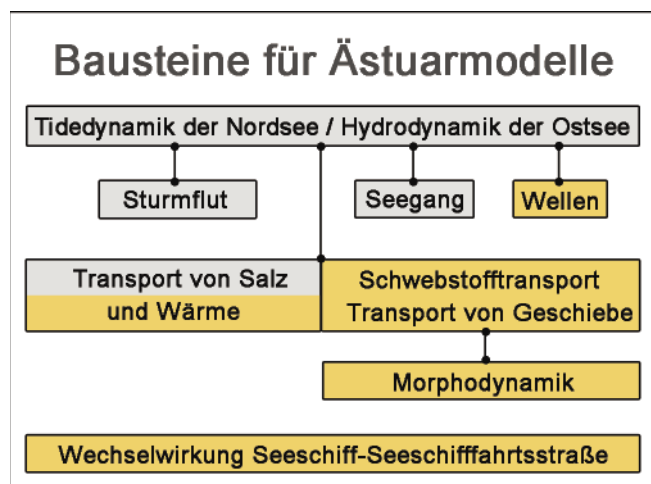


Bild 2: Bausteine zur umfassenden Simulation der Prozesse in Ästuaren

Im Rahmen zurückliegender Ausbauuntersuchungen wurde vornehmlich die Tide- bzw. Hydrodynamik einschließlich der Sturmfluten untersucht. Zur Beurteilung heute und zukünftig geplanter Maßnahmen treten Fragen zum Transport von Salz und Feststoffen sowie damit gekoppelte morphologische Entwicklungen hinzu, die vor allem auch mit 3D-Prozessen verbunden sind. Diese spielen insbesondere bei Fragen des Strombaus und der Beweissicherung eine dominierende Rolle. Zur Modellierung der einzelnen Prozesse sind somit verschiedene Modellbausteine in einer dynamischen, wählbaren Kopplung erforderlich.

Die umfassenden Ästuarmodelle erfordern leistungsfähige Rechnersysteme. Die Verfügbarkeit eines Supercomputers ist somit zwangsläufig zu einer wichtigen Voraussetzung für die Aufgabenbearbeitung in der BAW geworden. Vor jeder Beschaffung eines neuen Hochleistungs-Computersystems ist eine Bestandsaufnahme der bestehenden Ästuarmodelle und eine Analyse der mittelfristig zu erwartenden weiteren Entwicklung der fachlichen Anforderungen erforderlich. Hieraus ergeben sich die informationstechnischen Anforderungen an die Rechnerarchitektur und Leistungsfähigkeit des Systems. In der Weiterentwicklung sind aber auch die optimalen Pfade zur Wirtschaftlichkeit des Modelleinsatzes herauszufinden. Konkret sind folgende Fragen zu beantworten:

- Welche Küstenmodelle benötigt die BAW und welche Zustände sollen damit simuliert werden?
- Wie groß ist der Rechenaufwand für die Modelle und welche Datenmengen werden erzeugt?
- Welche fachlichen Anforderungen bestehen hinsichtlich der Weiterentwicklung und was folgt daraus für die Entwicklung der numerischen Verfahren sowie für den Wirkbetrieb der HN-Modelle?
- Wo liegt das wirtschaftliche Optimum für Einsatz und Entwicklung der Modelle?

Die Ästuarmodelle der BAW erstrecken sich von der landseitigen Grenze (z. B. der Tidegrenze oder dem Übergang zur Binnenwasserstraße) bis in den Mündungsbereich, wo die Fahrrinne ausreichende Tiefen in der Nord- oder Ostsee erreicht. Je nach Fragestellung kann aber auch das Seegebiet der Deutschen Bucht bzw. der Ostsee hinzugenommen werden, um auch Maßnahmen bzw. natürliche Veränderungen im Bereich der äußeren Seeschiffahrtsstraßen mit zu erfassen. Die Qualität der Lösung, die mit dem Modell erreicht werden kann, ist von der Qualität der Randwerte abhängig, mit denen dem Modell eine charakteristische Dynamik im Zuge der Simulation aufgeprägt wird. Die zeitabhängigen Randwerte für Wasserstand, Salzgehalt, Schwebstoff und Oberwasserzufluss werden daher auch als Steuerkurven bezeichnet. Weitere sehr wichtige Qualitätsmerkmale ergeben sich aus der Genauigkeit der Modell-Topographie die durch die Qualität der Vermessung und Feinheit des Gitternetzes

(Modellauflösungsvermögen) bestimmt ist. Mit zunehmendem Modellauflösungsvermögen steigt die Anzahl der Gitterpunkte. Auf der Grundlage von quadratischen Gitternetzen hat die BAW bereits 3D-Modelle mit mehr als 25 Mio. Gitterzellen aufgebaut. Große Lösungsgebiete erzwingen daher den Einsatz unstrukturierter Gitternetze mit variabler Netztopologie, mit denen die Strombauwerke und Nebenflüsse in der erforderlichen Feinheit aufgelöst werden können.

Die Modelleigenschaften bestimmen den erforderlichen Rechenaufwand im Zusammenhang mit den fachlichen Fragestellungen. Man betrachte einmal die Anzahl der Zustandsgrößen, die an jedem Gitterpunkt eines Modells berechnet werden: Wenn alle physikalischen Größen berücksichtigt werden sollen, kann heute z. B. ein 2D-Modell 21 Zustandsgrößen pro Gitterpunkt berechnen und auf den Massenspeicher des Rechners schreiben. Bei einem 3D-Modell der Jade, Weser oder Elbe werden in den tiefen Gebieten je Gitterpunkt mindestens 120 Zustandsgrößen berechnet, wenn die Strömungen in horizontalen Schichten von 1 m Mächtigkeit erfasst werden. Bei einer Wassertiefe von 10 m sind es mindestens 40 Zustandsgrößen, die bei 1 m Schichten berechnet werden.

Bisherige Schwerpunkte der Untersuchungen an der Ems waren Sturmfluten, Tidedynamik, Stauffallmodellierung für das Emssperrwerk, Strombau und Sedimenttransport. Der Sedimenttransport ist zukünftig auch für die Optimierung von Klappstellen vor allem auch in der Zusammenarbeit mit niederländischen Fachbehörden sehr wichtig. Dort werden Entscheidungen für Klappstellenorte mit Simulationsmodellen vorbereitet, die auch von deutscher Seite bewertet werden müssen. Für den Strombau werden alle wirtschaftlich sinnvollen und vor allem auch wirksamen Maßnahmen durch mathematische Simulation optimiert, um den Feststoffeintrag in das Ästuarsystem zu minimieren. Für diese Fragestellungen erfordert das System Ems künftig sehr umfangreiche 3D Simulationen. Derzeit betreibt die BAW sechs verschiedene Modelle für die Ems. Ein weiteres hoch auflösendes, unstrukturiertes Modell wird aktuell erstellt.

Jade und Weser sind in ihren Außenbereichen durch tide- und windbeeinflusste Verdriftungsprozesse über das Hohe-Weg Watt miteinander gekoppelt. Voneinander getrennte Einzelmodelle sind daher fachlich nicht vertretbar. Je nach Fragestellung sind aber verfeinert zu erfassende Strukturen entweder in der Jade oder in der Weser notwendig (unstrukturierte Modellverfahren). Zukünftige Aufgabenschwerpunkte sind: Beweissicherung zum letzten 14-m-Ausbau, erneute Anpassung von Außen- und Unterweser, Unterhaltungsfragen am Blexer Bogen und in der Schlickstrecke bei Nordenham, Verlegung und Unterhaltung des Jadefahrwassers, Jade-Weser-Port. Die anstehenden Fragen erfordern eine hohe dreidimensionale Modellauf-

lösung. Derzeit betreibt die BAW sieben verschiedene HN-Modelle für das Jade-Weser-System. Hinzu kommen noch zwei Seegangmodelle, die in ähnlicher Form auch für andere Ästuarmündungen und für Helgoland vorhanden sind.

Für die Elbe unterhält die BAW derzeit fünf Tide- und Sturmflutmodelle. Zukünftige Aufgabenschwerpunkte an der Elbe sind derzeit:

- Beweissicherung zum letzten 14,4-m-Ausbau,
- Analyse des Entwicklungspotenzials des Elbeästuars einschließlich Dämpfung von Tidehub und Strömung,
- Strombau zur Optimierung der Unterhaltung (einschließlich Klappstellenuntersuchung),
- erneute Fahrrinnenanpassung,
- Untersuchung der Sedimentationsverhältnisse in der Wechselwirkung mit den Prozessen im Hamburger Hafen,
- Untersuchung der morphologischen Prozesse im Mündungsgebiet der Elbe.

Alle strömungs- und transportrelevanten Fragen sind mit 3D-Prozessen verbunden, die fein aufgelöst simuliert werden müssen.

Die seeseitigen Ränder der Gesamtästuarmodelle an der Nordsee liegen mit beträchtlicher Ausdehnung (bis zu 60 km pro Modell) im Bereich der Deutschen Bucht. Hier gibt es nur wenige Pegel, mit deren Daten allein keine amplituden- und phasenrichtigen Steuerkurven für die Ränder der Ästuarmodelle gewonnen werden können. So weit draußen ist die Messung der tide- und wetterbedingten Variationen des Wasserstandes über einen Zeitraum von mehreren Wochen mit einem sehr großen Aufwand verbunden. Darüber hinaus wird ein gewählter Messzeitraum in der Regel keinen vollständig repräsentativen, charakteristischen Systemzustand erfassen. Mehrere charakteristische Systemzustände zu erfassen, ist nahezu unmöglich. Es ist daher erforderlich, die Pegeldata vergangener Perioden zu analysieren und mit Hilfe eines mathematischen Modells der Deutschen Bucht / Nordsee - an das die vollständigen Ästuarmodelle mit verringerter Auflösung der Topographie gekoppelt sind - im sogenannten „hindcast“ zu simulieren. Auf diese Weise können Steuerkurven für beliebige charakteristische Systemzustände gewonnen werden.

Das Gesamtmodell für alle Ästuar einschließlich der Deutschen Bucht / Nordsee dient zukünftig aber auch der Analyse der Sediment austauschprozesse zwischen den Ästuarmündungen, da gerade hier die größten Sedimentmengen umgelagert werden. Diese Untersuchungen sind insbesondere wichtig für den Themenkreis Beweissicherung und für alle wasserbaulichen Fragen, die mit morphologischen Folgewirkungen verbunden sind. Darüber hinaus müssen für

Sturmflutuntersuchungen (Nachweis der Hochwasserneutralität im Zuge von Ausbaumaßnahmen) zukünftig auch Wind- und Druckfelder über der Nordsee einschließlich deren Wirkung auf die Ästuarsysteme berechnet werden.

3D-Prozesse lassen sich besonders gut in Ästuaren studieren, die mehr durch das Wettergeschehen als durch periodische Tideprozesse beeinflusst sind. Derartige Systeme müssen a priori über einen längeren Zeitraum (mehrere Monate) betrachtet werden, um die Einflüsse des stochastischen Wettergeschehens auf die Systemreaktion umfassend zu bewerten. Die BAW hat für den Ausbau des Marinehafens Warnemünde ein 3D-Modell für den Seekanal Rostock, Breitling und die Unterwarnow aufgebaut. Die Reaktion dieses Systems auf die winderzeugten Eigenschwingungen der Ostsee, auf den lokalen Windschub und auf gesteuerte, zum Teil stark schwankende Oberwassermengen kann besonders gut mit den Vermischungsprozessen innerhalb der Brackwasserzone - in Form der sehr variablen Salzgehaltszonierungen / Salzgehaltschichtungen - dargestellt werden. Zur Abschätzung ausbaubedingter Wirkungen bedarf es hier einer geeigneten Statistik zur Analyse der ausbaubedingten Wirkungen.

Wenn es ausschließlich um die Analyse von Wasserständen, Strömungen und Durchflüssen im Bereich der Nordsee geht, ist im Rahmen von Voruntersuchungen zumindest ein 14-tägiger Simulationszeitraum das Minimum für eine sachgerechte Bearbeitung wasserbaulicher Fragestellungen an der Küste. Fragen zum Salz- und Sedimenttransport erfordern weit längere Zeiträume, die auf dem Rechner naturnah nachgebildet werden müssen.

In der Summe verfügt die BAW derzeit über mehr als 20 verschiedene Ästuarmodelle, die je nach fachlicher Fragestellung und Projektfortschritt eingesetzt werden. Bei der genannten Anzahl der Modelle ist noch nicht die Vielzahl der Varianten berücksichtigt, die im Rahmen der Projekte zusätzlich gebildet werden müssen.

Zur Qualitätssicherung der Modellergebnisse und der aus diesen im Rahmen von öffentlich-rechtlichen Verfahren gewonnen Prognosen spielt die Verfügbarkeit von speziellen Messergebnissen (z. B. bis an die Sohle heranreichende Strömungen über die gesamte Wassersäule, Salzgehalte, horizontale und vertikale Salzgradienten, Schwebstoffkonzentrationen und deren Zusammensetzung, Beschaffenheit und Zusammensetzung des Sohlmaterials) eine wichtige Rolle. Verfeinerte Simulationsverfahren erzwingen spezielle Messungen in der Natur, die nicht durch operationelle gewässerkundliche Messungen erbracht werden können. Ein weiterer wichtiger Aspekt ergibt sich aus der Tatsache, dass jedes Simulationsverfahren letztlich ein „Stück Software“ darstellt, daher prinzipiell auch fehlerbehaftet sein kann. Diesem Umstand trägt die BAW

durch parallelen Einsatz verschiedener, international anerkannter und eingesetzter Simulationsverfahren Rechnung, die unter der Kurzbezeichnung TRIM, UnTRIM und Telemac in Fachkreisen bekannt sind. Da UnTRIM und Telemac heute auf Grundlage identischer Gitternetze eingesetzt werden kann, wird ein direkter Vergleich der Simulationsergebnisse durchgeführt.

Die Wirtschaftlichkeit des Modelleinsatzes ergibt sich aus einheitlichen Verfahren im Pre- und Postprocessing der Ästuarmodelle und in der Anwendung einheitlicher Standards in der Entwicklungsumgebung. Darüber hinaus entwickelt die BAW derzeit einheitliche Schnittstellen für die Kopplung verschiedener Modellbausteine. Wünschenswert ist die Harmonisierung dieser Schnittstellen mit den Entwicklungen vergleichbarer Institutionen.

Die mathematischen Modelle liefern heute wichtige Grundlagen für Entscheidungen über die Machbarkeit einer Maßnahme, für die Konzeption, Ausführung und Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme und für die Optimierung der Seeschiffahrtsstraße nach Realisierung einer Maßnahme.