

Hans von Storch, Jens Kappenberg, Rolf Riethmüller

**Modelle: Naturwissenschaftlich-mathematische  
Konstrukte der Küste**

aus:

Küstenbilder, Bilder der Küste

Interdisziplinäre Ansichten, Ansätze und Konzepte

Herausgegeben von

Martin Döring, Wolfgang Settekorn und Hans von Storch

S. 275–286

## Impressum

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek:

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Diese Publikation ist außerdem auf der Website des Verlags Hamburg University Press *open access* verfügbar unter <http://hup.rrz.uni-hamburg.de>

Die Deutsche Bibliothek hat die Netzpublikation archiviert. Diese ist dauerhaft auf dem Archivserver Der Deutschen Bibliothek verfügbar unter <http://deposit.ddb.de>

Umschlagabbildung: Abteilung für Radarhydrographie, Institut für Küstenforschung, GKSS-Forschungszentrum; Radarechos vom Ellenbogen/Sylt, aufgenommen mit seitlich blickender Antenne von einem fahrenden Schiff (FS Ludwig Prandtl) aus.

ISBN 3-9808223-1-1 (Print)

© 2005 Hamburg University Press, Hamburg

<http://hup.rrz.uni-hamburg.de>

Rechtsträger: Universität Hamburg

Produktion: Elbe-Werkstätten GmbH, Hamburg

<http://www.ew-gmbh.de>

Gefördert durch das



# Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	7
Zur Einleitung: Küstenbilder interdisziplinär .....	9
<i>Martin Döring, Wolfgang Settekorn, Hans von Storch</i>	
1 Grundfragen	
Das Feste und das Flüssige .....	29
Zur Ideologie- und Wahrnehmungsgeschichte des Wattenmeeres und der Halligen <i>Ludwig Fischer</i>	
2 Küstenbilder in wissenschaftlichen Disziplinen	
2.1 Kunstgeschichte	
Grenzerfahrungen der Zivilisation – Das Bild der Küste .....	77
<i>Johannes Hartau</i>	
2.2 Ozeanographie	
Ungeheuer und unbekannte Größen .....	109
Meer und Küste im Spiegel meereskundlicher Lehrbücher seit dem 18. Jahrhundert <i>Gerd Wegner</i>	
2.3 Geschichte	
Das Leben an der Küste .....	161
Eigenheiten einer bäuerlichen Gesellschaft <i>Manfred Jakobowski-Tiessen</i>	
2.4 Literaturwissenschaft	
Die narratologische Küste .....	181
Küstenbilder in zwei Romanen und Kurzgeschichten Guy de Maupassants <i>Martin Döring</i>	

## Inhaltsverzeichnis

### 2.5 Sprach- und Medienwissenschaft

Sprache und Bild in der Küstenwerbung .....	219
Zu Elementen der Konzeptualisierung von Küstenbildern <i>Wolfgang Settekorn</i>	

### 2.6 Gewässerphysik

<b>Modelle: Naturwissenschaftlich-mathematische Konstrukte der Küste .....</b>	<b>275</b>
<i>Hans von Storch, Jens Kappenberg, Rolf Riethmüller</i>	

### 2.7 Soziologie

Küstenbilder soziologisch betrachtet .....	287
<i>Hans-Werner Prah</i>	

## 3 Küstenbilder in der Praxis

Küste als Raum der Erholung und der Freizeit .....	303
<i>Jürgen Hasse</i>	

Zukunftsbilder des Küstentourismus – Zwischen Ökonomie und Ökologie? .....	323
<i>Anette Seidel</i>	

Der Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer – Auch eine Realität von Küste .....	339
<i>Bernd Scherer</i>	

## 4 Ausblick

Von der Zukunft der Wissenschaftskulturen und den Bedingungen der Transdisziplinarität .....	351
<i>Nico Stehr</i>	

Verzeichnis der Autorinnen und Autoren .....	361
--	-----

# Modelle: Naturwissenschaftlich-mathematische Konstrukte der Küste

Hans von Storch, Jens Kappenberg, Rolf Riethmüller

Küstenforschung als naturwissenschaftliche Disziplin hebt ab auf das Verstehen des Zustandes und der Änderungen der Küste. Dabei geht es sowohl um die Analyse gegenwärtiger Zustände und Veränderungen als auch um die Rekonstruktion vergangener Vorgänge. Eine zentrale Anwendung ist die Fähigkeit, zukünftige Entwicklungen abschätzen oder sogar prognostizieren zu können. Ein wichtiger Aspekt ist die Unterscheidung natürlicher und anthropogener Ursachen.

Aus geophysikalischer Sicht ist die Küste der Ort, in dem Strömungen und Winde Energie und Material zwischen Meer, Atmosphäre und Land austauschen und verteilen. Dadurch wird die Küste in Raum und Zeit umgestaltet. Energie wird aus der Luft eingetragen durch Winde, die Seegang und Sturmfluten bewirken; Gezeiten und die aus ihnen resultierenden Strömungen hingegen sind astronomischen Ursprungs. Strömungen transportieren Materialien wie Meerwasser, Süßwasser (das durch Flüsse oder Niederschläge in das System eingespeist wird) und Schwebstoffe (Agglomerate aus Tonmineralien, Sand und organischem Material) oder Pflanzen und Tiere.

Hinzu kommen anthropogene Problemstoffe wie Nährstoffe aus Abwässern und Landwirtschaft, Schwermetalle (wie Blei, Cadmium, Quecksilber in verschiedenen Bindungsformen) und die Vielzahl organischer chemischer Verbindungen, die als *persistent organic pollutants* dauerhaft in den Sedimenten und Organismen der Küstenbereiche verbleiben.

In dieses geophysikalische System eingebettet sind das biologische System und der Mensch mit seinen vielfältigen Aktivitäten; diese drei zusammen machen das Ökosystem aus. Das geophysikalische System bedingt die Ausprägung des biologischen Systems. Ein Beispiel ist die Durchmischung der Wassersäule und die damit verbundene Selbstab-

schattung der Algen. Die biologischen Prozesse wirken zurück auf das geophysikalische System, etwa auf die Festigkeit des Meeresbodens oder der Dünen gegenüber den Kräften der Tidenströmungen und des Windes. Beide Systeme prägt der Mensch entscheidend mit: etwa durch die Festlegung der Küsten mit Deichen und Dämmen, durch die Fischerei oder Freizeitaktivität.

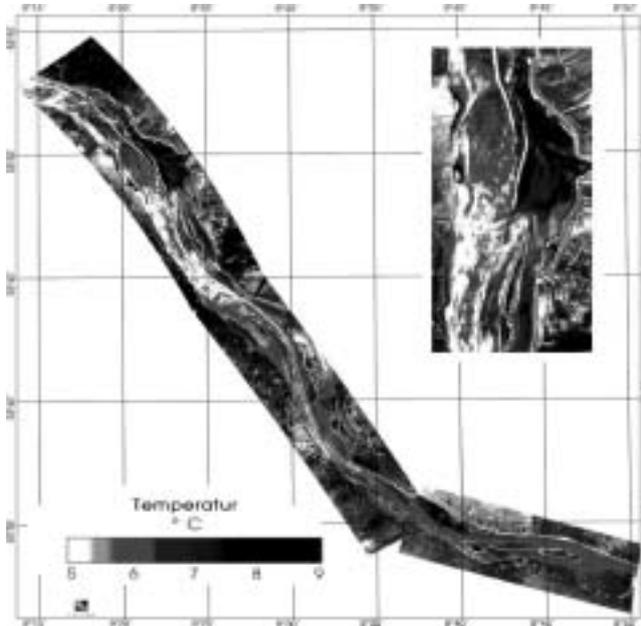


Abb. 1: Verteilung der oberflächennahen Wassertemperatur in der Unterelbe am 16. April 1993. Aus dem Fundus der Autoren.

Naturwissenschaft, und damit auch die naturwissenschaftliche Küstenforschung, ist ein Dialog mit der Natur: Fragen und Behauptungen werden in Form von Hypothesen vorgebracht und die Natur antwortet im Rahmen experimenteller Anordnungen oder Feldbeobachtungen, welche oft mit der Realität gleichgesetzt werden. Aber auch sie zeigen nur ein Bild, einen Aspekt der Realität „Küste“. So ist die vom Flugzeug aus gewonnene Aufnahme der oberflächennahen Temperaturverteilung in der Elbe am

16. April 1993 (Abb. 1) nicht nur durch „natürliche Verhältnisse“ im Gewässer geprägt, sondern auch durch die Eigenschaften des Messgerätes und seine Bedienung durch den Messenden. Dem menschlichen Auge wären diese Bilder auch gar nicht sichtbar, sondern sie sind Ergebnisse der Umsetzung von Messergebnissen durch eine hoch entwickelte elektronische Bildverarbeitung.

Ein besonderes Merkmal der physikalischen Herangehensweise an die Erkenntnis der Natur ist, dass sie sich mit solchen Vorgängen beschäftigt, „von denen man hoffen darf, daß sie auf Grund weniger Prinzipien in Gedanken nachkonstruiert werden können“.<sup>1</sup> Solche Konstrukte der Natur werden in der Physik als *Modelle* bezeichnet, wobei dem Modellbegriff die Reduktion inhärent ist. So wird das Modell definiert als

„die Abbildung komplizierter Strukturen, Funktionen und Verhaltensweisen eines Objektes oder Systems von Objekten in vereinfachter, nur auf die wesentlichsten Eigenschaften beschränkter, übersichtlicherer Form“<sup>2</sup>

oder

„ein Abbild der Natur unter Hervorhebung für wesentlich erachteter Eigenschaften und Außerachtlassen als nebensächlich angesehener Aspekte“.<sup>3</sup>

## 1 Hydraulische Modelle der Küste

In den Ingenieurwissenschaften werden in genau festgelegten Verhältnissen verkleinerte Nachbildungen natürlicher Systeme zum Beispiel zur Analyse der Auswirkungen von Baumaßnahmen eingesetzt. Im Küsteningenieurwesen waren solche hydraulischen Modelle (Abb. 2), die wie Modelleisenbahnen als wasser- und sandgefüllte Becken in großen Hallen betrieben wurden, über lange Zeit das bevorzugte Arbeitsmittel. Durch eine Reihe von Maschinen war es möglich, äußere Kräfte wie die Gezeiten der offenen See, Seegang

---

<sup>1</sup> Hund, Friedrich (1969): Grundbegriffe der Physik. Mannheim, S. 9.

<sup>2</sup> Brockhaus abc Physik (1972). Leipzig, S. 1000.

<sup>3</sup> Brockhaus – Die Enzyklopädie (1998). Band 15. Leipzig, S. 11.

und Zufluss von Süßwasser nachzuahmen. Die Bodenreibung wurde durch die senkrechten Stäbe reguliert. An verschiedenen Punkten des die Bucht darstellenden Beckens wurde der zeitliche Verlauf von Strömung und Wasserstand registriert.

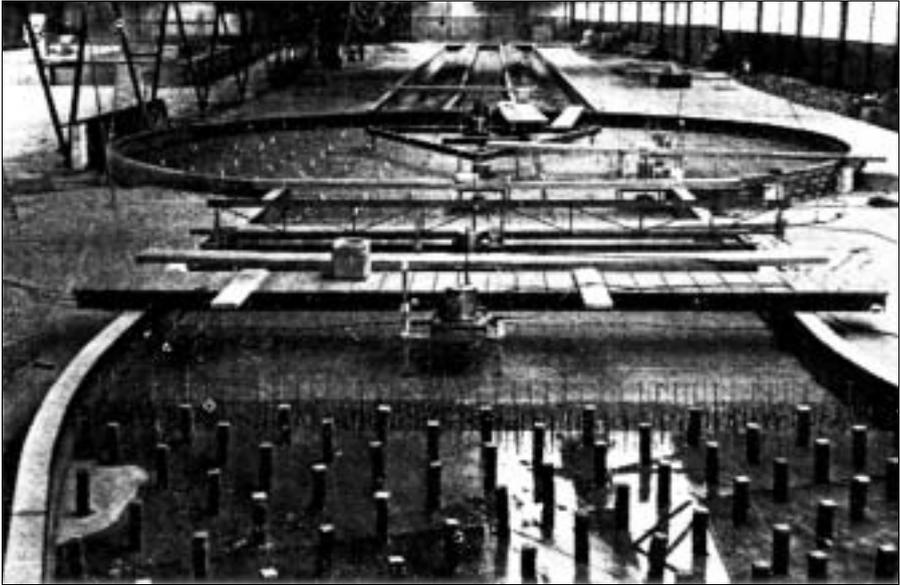


Abb. 2: Ein hydraulisches Modell einer Bucht. Aus: Sündermann/Vollmers (1972).

## 2 Numerische (mathematische) Modelle der Küste

Der große Erfolg der physikalisch orientierten Naturwissenschaften beruht wesentlich auf der Mathematik als Sprache dieses Dialoges. Ein konkreter Naturraum ist daher, naturwissenschaftlich betrachtet, ein gedankliches Konstrukt, dessen mathematischer Ausdruck sich meist in der Formulierung bestimmter Teilaspekte als Satz vernetzter Differentialgleichungen findet. Die Lösungen dieser Gleichungen simulieren mögliche zeitliche Abläufe in diesem Naturraum, sie geben eine Prognose der Zukunft.

„Das geordnete mathematische Denken ist sicher ein wesentliches Element der heutigen Naturwissenschaft; es reicht aber nicht entfernt aus. [...] Wir wissen über weite Gebiete, auch der einfachen Natur, sehr wenig Fakten. Und da, wo wir viele Fakten wissen, bedarf es neben der mathematischen Ordnung auch der Phantasie des Naturwissenschaftlers, der die Fülle der Fakten überschaut (und ordnet).“<sup>4</sup>

In die mathematischen Formulierungen des Gesamtsystems „Küste“ gehen neben den geophysikalischen und biologischen Teilen prinzipiell auch die politischen, sozialen und ökonomischen Aktivitäten des Menschen ein.

Die Modellbildung geschieht meist durch eine induktive Vorgehensweise: Zuerst werden Einzelprozesse untersucht und diese dann zur Beschreibung des Gesamtsystems miteinander verknüpft. Solche Einzelprozesse sind zum Beispiel die Gezeiten, der Windschub oder die Ablagerung von Schwebstoffen.

Im Prinzip geht man auf folgende Weise vor: Die auf ein „Küstenelement“ X wirkenden Prozesse werden katalogisiert, ihrer Relevanz nach geordnet, und die wichtigsten Prozesse werden in „Prozessstudien“ detailliert untersucht. X kann dabei sein die Strömung, die Topographie, die Seegangsstatistik, die Windenergie, die Primärproduktion und Ähnliches. Die zeitliche Entwicklung wird in diesem Konstrukt so formuliert:

$$\frac{dX}{dt} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots$$

mit der „Zeitableitung“

$$\frac{dX}{dt}$$

Ein Beispiel für ein System solcher Gleichungen beschreibt die Veränderung der Strömung und des Wasserstandes als Resultat von Prozessen wie „Gezeit“, „Bodenreibung“, „Turbulenz“ und „Erdrotation“:

---

<sup>4</sup> Hund (1969).

$$(1) \quad \frac{du}{dt} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{ru}{h+\zeta} \sqrt{u^2+v^2} + A_H \Delta u + fv$$

$$\text{mit } P_1 = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \text{Gezeit, } P_2 = -\frac{ru}{h+\zeta} \sqrt{u^2+v^2} = \text{Bodenreibung,}$$

$$P_3 = A_H \Delta u = \text{Turbulenz, } P_4 = fv = \text{Erdrotation.}$$

$$(2) \quad \frac{dv}{dt} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{rv}{h+\zeta} \sqrt{u^2+v^2} + A_H \Delta v + fu$$

$$\text{mit } P_1 = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} = \text{Gezeit, } P_2 = -\frac{rv}{h+\zeta} \sqrt{u^2+v^2} = \text{Bodenreibung,}$$

$$P_3 = A_H \Delta v = \text{Turbulenz, } P_4 = fu = \text{Erdrotation.}$$

$$(3) \quad \frac{d(h+\zeta)}{dt} = 0$$

Die zu prognostizierenden „Küstenelemente“  $X$  sind die Variablen oder Zustandsgrößen des Modells. Im Beispiel sind dies Strömungskomponenten  $u(t,x,y)$ ,  $v(t,x,y)$  in  $x$ - und  $y$ -Richtung und aktuelle Wassertiefe  $(h+\zeta)(t,x,y)$ .

Ferner bedeuten:

$h(x,y)$  Mittlere Wassertiefe,

$\zeta(t,x,y)$  Gezeitenbedingte Wasserstandsschwankung,

$A_H$  Interne Reibung,

$f$  Coriolisparameter (Erdrotation),

$g$  Fallbeschleunigung,

$r$  Bodenreibung;

$h$ ,  $A_H$ ,  $f$ ,  $g$ ,  $r$  bezeichnet man als Parameter des Modells. Die Werte dieser Parameter werden zumeist aus Experimenten gewonnen (siehe nächster Abschnitt). Aus dem „Prozessverständnis“ für den Prozess  $P_i$  ergibt sich eine mathematische Formulierung des Prozesses:

$$P_i = f_i(X, a, b, c \dots),$$

wobei  $a$ ,  $b$ ,  $c \dots$  für äußere Einflüsse und Parameter steht und  $i$  ein Index der Relevanz von  $P_i$  für  $\frac{dY}{dt}$  sein soll: Je kleiner  $i$ , desto relevanter  $P_i$ . Die Prozessmodelle  $P_i$  selbst können empirischer Art sein oder selbst wieder zusammengesetzt sein aus mehreren Prozessmodellen. In unserem Beispiel sind die Prozesse „Gezeit“ und „Bodenreibung“ sehr relevant, das heißt sie

haben kleine Indizes  $i$ . Turbulenz und Erdrotation sind weniger relevant und durch größere Indizes gekennzeichnet.

Ein geschlossenes, mathematisches, realitätsnahes Modell entsteht aus der Überlagerung der Einzelmodelle:

$$\frac{dX}{dt} = f_1(X,a,b,c \dots) + f_2(X,a,b,c \dots) + \dots + f_n(X,a,b,c \dots)$$

Dabei wird angenommen, dass Prozesse mit Relevanz-Indizes  $i > n$  für die wesentlichen Aspekte der „Dynamik“ von  $X$  unbedeutend sind. Dieses Modell wird dann noch mit Methoden der numerischen Mathematik in eine Form transformiert, die es gestattet, das Modell auf einem Computer zu berechnen. Diese Computermodelle werden dann eingesetzt, um gegenwärtige Zustände zu analysieren und Fälle nachzuempfinden. Andere Anwendungen sind Vorhersagen oder Abschätzungen, wie geplante menschliche Eingriffe sich auf das Funktionieren des Systems auswirken könnten. Auch können in der virtuellen Realität der Modelle Experimente durchgeführt werden, die in der Realität nicht möglich wären. Ein Beispiel eines solchen Experiments wäre die Wirkung eines deutlich erhöhten Wasserstandes.

### 3 Ein Vergleich von hydraulischen und numerischen Modellergebnissen

In einer Untersuchung von Jürgen Sündermann und Hans Vollmers<sup>5</sup> wurden die Ergebnisse eines hydraulischen und eines numerischen Modells einer idealisierten flaschenförmigen Bucht (Abb. 3) untersucht. Dabei zeigten sich gute Übereinstimmungen beim zeitlichen Verlauf der Strömung (Abb. 4).

---

<sup>5</sup> Sündermann, Jürgen / Vollmers, Hans (1972): Tidewellen in Ästuarien. In: Wasserwirtschaft 62, Heft 11, S. 1–9.

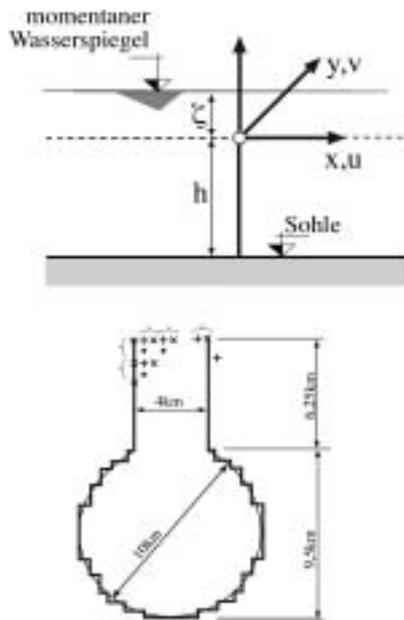


Abb. 3: Schema der Modellgröße und der Modellbucht. Aus: Sündermann/Vollmers (1972).

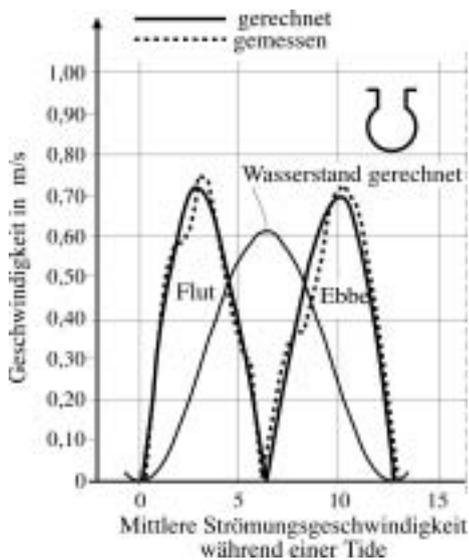
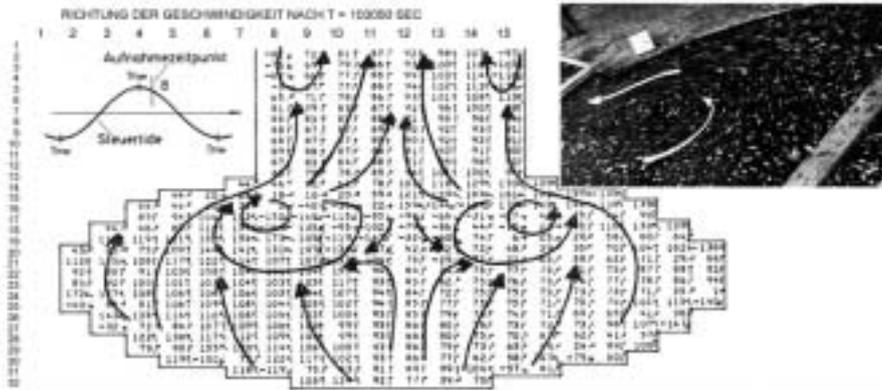
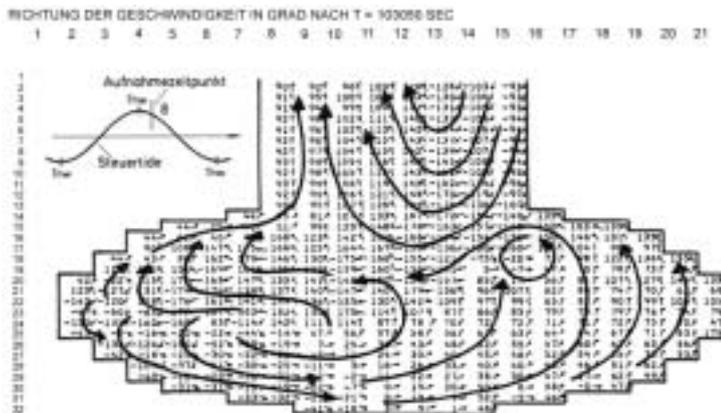


Abb. 4: Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Strömung. Durchgezogene Linie: hydraulisches Modell; punktierte Linie: numerisches Modell. Aus: Sündermann/Vollmers (1972).

Merkliche Abweichungen ergaben sich dagegen bei der Strömungsrichtung (Abb. 5). Diese resultieren aus der Einbeziehung der Corioliskraft im numerischen Modell, während diese im hydraulischen Modell technisch nicht nachzubilden war. Das heißt: Für das hydraulische Modell ist die Einflussgröße Corioliskraft  $P_i$  mit großem Index  $i > n$  bewertet und wird vernachlässigt.



Oben: hydraulisches Modell.



Unten: numerisches Modell.

Abb. 5: Richtung der oberflächennahen Strömung. Aus: Sündermann/Vollmers (1972).

#### 4 Laborexperimente mit Küstenelementen: Bestimmung des Parameters der kritischen Schubspannung für die Erosion des Küstenbodens

Eine andere naturwissenschaftliche Methode, sich ein Bild von der Küste zu machen, ist, Küstenprozesse im Labor nachzubilden. So werden im Beispiel die Erosionseigenschaften der Sohle von Küstengewässern untersucht, indem im Feld gewonnene zylindrische Bohrkerne aus der Gewässersohle (mit dem darüber stehenden Wasser) regelbaren Kräften (Sohlschubspannungen) ausgesetzt werden.

Damit kann die Belastung der Sohle durch Strömungen (zum Beispiel während des Gezeitenzyklus) und Wellen nachgebildet werden. Die Sohlschubspannungen werden im Beispiel (Abb. 6) durch einen horizontalen Propeller mit stufenlos veränderbarer Drehzahl erzeugt.

Steigert man im Versuch die Drehzahl schrittweise (Abb. 7), so verbleibt das Sediment zunächst fast ungestört am Boden (Abb. 7.1 und 7.2). Erst bei Erreichen einer kritischen Schubspannung (Abb. 7.3) wird es explosionsartig aufgewirbelt und trübt das darüber stehende Wasser: Sediment wird zu Schwebstoff. Die Abbildungen 7.4 und 7.5 zeigen, dass dann ohne weitere Erhöhung der Schubspannung weiteres Sediment in das Wasser eingemischt wird, das dann völlig undurchsichtig wird. Bei Reduzierung der Schubspannung setzt sich nach Abklingen der Turbulenz der Schwebstoff wieder ab und bildet erneut das Bodensediment. Der Vorgang ist reversibel und läuft in der Natur bei jedem Gezeitenwechsel ab.

Die Stärke der Trübung kann zusätzlich auch als Maß für die „Ergiebigkeit“ des Bodens verwendet werden. Kritische Schubspannung und Ergiebigkeit sind Parameter, die in Modellen der Schwebstoff- und Sedimentdynamik von zentraler Bedeutung sind. Die detaillierte Betrachtung des Ablaufs der Ablösung von Bodenpartikeln ist Inspiration für Änderungen der Prozessformulierung und damit des naturwissenschaftlichen Küstenbildes.



Abb. 6: Versuchsanordnung zur Bestimmung der kritischen Schubspannung für Küstensedimentkerne. Aus dem Fundus der Autoren.

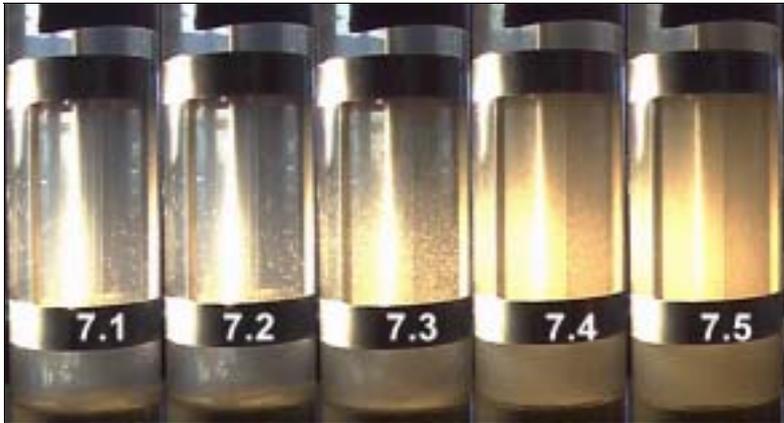


Abb. 7: Durchführung des Erosionsversuchs. Schrittweise Erhöhung der Schubspannung von 1 nach 5. Die kritische Schubspannung ist bei Bild 7.3 erreicht. Aus dem Fundus der Autoren.

## 5 Ausblick

In der Vergangenheit sind große Fortschritte in dem Verständnis und der Modellierung von Teilaspekten und Kombinationen wie „Strömung und Seegang“ erzielt worden; diese Fortschritte sind die Voraussetzungen für Erfolg versprechende Bemühungen, alle Komponenten miteinander zu koppeln. Mit solchen holistischen, realitätsnahen Modellen des Ökosystems Küste wird es möglich sein, die über Jahre und Jahrzehnte vonstatten gehenden Veränderungen abzubilden. Damit werden die naturwissenschaftlichen Küstenmodelle unmittelbar gesellschaftlich relevant und treten im gesellschaftlichen Meinungsbildungsprozess in einen Wettbewerb mit anderen, nicht-naturwissenschaftlichen Küstenbildern.

## Literatur

- Brockhaus abc Physik (1972). Leipzig.  
 Brockhaus – Die Enzyklopädie (1998). Band 15. Leipzig.  
 Hund, Friedrich (1969): Grundbegriffe der Physik. Mannheim.  
 Sündermann, Jürgen / Vollmers, Hans (1972): Tidewellen in Ästuarien. In: Wasserwirtschaft 62, Heft 11, S. 1–9.