

DAGMAR HAINBUCHER und JAN O. BACKHAUS

FILM D 1840

**Strömungen und Ausbreitung  
von gelösten Stoffen in der Nordsee**

Sonderdruck

Publ. Wiss. Film., Techn. Wiss./Naturw. 12 (1995), 1–16.

DAGMAR HAINBUCHER und JAN O. BACKHAUS: Strömungen und  
Ausbreitung von gelösten Stoffen in der Nordsee. Film D 1840.  
ISSN 0073–8433



GÖTTINGEN 1995

INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM

DAGMAR HAINBUCHER und JAN O. BACKHAUS

## **Strömungen und Ausbreitung von gelösten Stoffen in der Nordsee**

Film D 1840

### **Allgemeine Vorbemerkungen**

#### **1 Motivation und Ziel des Films**

Auch im Bereich der marinen Wissenschaften versucht man seit einigen Jahren, die visuellen Möglichkeiten zu nutzen, die der fortgeschrittene Entwicklungsstand der Computergrafik und Videoanimation bietet. Dadurch werden Wissenschaftlern weitere Methoden zur qualitativen Datenauswertung eröffnet und durch verbesserte didaktische Mittel in Lehre und Öffentlichkeitsarbeit das Verständnis für marine Prozesse verbessert (EUREKA-Projekt 495; VISIMAR: Visualisation and Simulation of Marine Environmental Processes).

Im Gegensatz zur Meteorologie, in der zumindest über Land eine relativ große Datendichte vorhanden ist, muß die Ozeanographie stärker auf die Simulationsergebnisse numerischer Modelle zurückgreifen, um die zeitliche und räumliche Dynamik der verschiedenen Prozesse erfassen und interpretieren zu können. Numerische Modelle liefern sehr große Datensätze mit Informationen über Wasserstand, Strömungen, Temperatur, Salzgehalt etc., die sich aufgrund ihrer lückenlosen Datendichte in Raum und Zeit besonders für die Videoanimation eignen. Die Animation erlaubt dann einen raschen Überblick über die Qualität der enormen Datenmengen und gewährt außerdem einen qualitativen Einblick in die zeitliche und räumliche Entwicklung der Dynamik der betrachteten Prozesse. Kürzere Animationssequenzen werden daher gerne als Vortragsergänzung auf Kongressen eingesetzt.

Dieser Film ist der Versuch, einzelne, kürzere computergenerierte Animationen unter einem übergeordneten Thema mit dem Ziel zusammenzufassen, Studienanfängern der marinen Wissenschaften und auch interessierten Laien einen Einblick in die Problematik der Ausbreitung von Stoffen in einem speziellen Meeresgebiet, der Nordsee, zu geben.

## 2 Umweltforschung am Beispiel der Nordsee

Mehr oder minder bedenkenlos werden bis in unsere heutige Zeit die von den Industriegesellschaften produzierten Abfallstoffe in die küstennahen Rand- und Schelfmeere geleitet. Dort verdünnen sich viele dieser Stoffe und vermitteln den Eindruck, daß kein erkennbarer Schaden zurückbleibt. Dieser Anschein trügt. Schon Mitte der 60er Jahre erkannte man Veränderungen der Pflanzen- und Tierwelt in belasteten Gewässern. Forschungsprogramme, die sich mit dieser Problematik beschäftigten, wurden häufig mit dem Ziel ins Leben gerufen, Belastungsgrenzen (Erträglichkeitsgrenzen, Störungsschwellen etc.) zu ermitteln. In diesem Sinne sind auch die 1972 begründete „Oslo Convention“ (Nordatlantik und Nordsee), die 1974 begründete „London Dumping Convention“ und die 1974 begründete „Paris Convention“ zu sehen. Diese regeln die Verklappung von Abfallstoffen in die hohe See und den indirekten landseitigen Eintrag durch Flüsse. Die Vereinbarungen wurden im Laufe der Jahre durch verschiedene EG-Richtlinien ergänzt. Die zunehmende Sorge um die Belastung der Nordsee drückte sich auch in den bisherigen Nordsee-schutzkonferenzen aus.

In der Bundesrepublik Deutschland werden heute viele kleinere und größere Projekte durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, durch das Bundesforschungsministerium und das Umweltbundesamt gefördert, die sich mit der Belastung des Ökosystems Nordsee beschäftigen. Zu nennen sind hier insbesondere die interdisziplinären Forschungsvorhaben ZISCH (BMFT, Zirkulation und Schadstoffumsatz in der Nordsee, 1985–89) und PRISMA (BMFT, Prozesse im Schadstoffkreislauf Meer – Atmosphäre, 1990–93), da in diesem Film Daten dieser Projekte gezeigt werden.

Ziehen wir ein Resümee zur Umweltforschung bzw. Umweltpolitik Nordsee, so können wir heute folgendes festhalten: Die Förderung von Projekten mit Schwerpunkt marine Umweltforschung durch staatliche Einrichtungen hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Eine Vielzahl neuer wissenschaftlicher Ergebnisse wurde in diesem Rahmen erzielt. Dennoch lassen sich heute aufgrund der Komplexität des marinen Ökosystems noch lange keine eindeutigen Aussagen über das Auswirken antropogener Einflüsse auf die marine Umwelt machen. Dies ist auch die Ursache vieler widersprüchlich erscheinender Aussagen von Wissenschaftlern in den Medien. Als Folge lassen sich wissenschaftliche Ergebnisse nur sehr schwer in politische Entscheidungen umsetzen.

Eines wurde allerdings von der Mehrheit der in der Umweltforschung aktiven Wissenschaftler erkannt: die Festlegung von Belastungsgrenzen ist problematisch, wenn nicht gar fragwürdig. Das Ökosystem Nordsee ist ein

hoch variables System. Mittlere Größen als Grundlage für die Ermittlung solcher Grenzen lassen sich daher nur schwer heranziehen. Die Abweichungen vom Mittel bestimmen das System. Spitzenbelastungen können sich irreparabel auf Teile des Ökosystems auswirken.

Die derzeitige Umweltpolitik hat sich sicherlich positiv auf den Belastungszustand der Nordsee ausgewirkt. So sind die Anteile vieler Schadstoffe, insbesondere der hochgiftigen Schwermetalle Cadmium und Quecksilber und nach Einführung des Katalysators in den PKWs auch das Blei, rückläufig (DANNEKER u. a. [7]). Die sensibilisierte öffentliche Meinung sorgt außerdem für ein bewußteres Umgehen mit der Umwelt. In diesem Sinne ist der hier erstellte Film ein Versuch der „wissenschaftlichen Öffentlichkeitsarbeit“, um Interessierten die Problematik „mariner Umweltforschung nahezubringen.

### 3 Simulationen von Zirkulation und Ausbreitung

Numerische Modelle werden seit Mitte der 50er Jahre im Bereich der Ozeanographie entwickelt. Für Zirkulationsmodelle hat sich heute ein umfangreicher Anwendungsbereich etabliert. Angefangen bei zweidimensionalen, barotropen Modellen (HANSEN [13], [14]) für die Sturmflutvorhersage, ist die Entwicklung heute auf dem Stand komplexer, dreidimensionaler, barokliner Modelle, die Prozeßstudien im gesamten Bereich der physikalischen Ozeanographie erlauben. Dieser Fortschritt wurde durch verbesserte numerische Verfahren zur vollständigeren Lösung der Modellgrundgleichungen (ROACHE [21]) und durch die kontinuierliche Erhöhung der Rechnerleistung und -kapazität ermöglicht.

Ozeanische Bewegungen werden nach ihren Raum- und Zeitskalen klassifiziert. Die größten und längsten Bewegungen (über 1 000 km, Monate bis Jahre) gehören zur planetarischen Skala, mit der die mittlere Zirkulation des Ozeans assoziiert wird. Ihr folgt die synoptische Skala (Rossby-Wellen, große Ozeanwirbel etc., mehrere hundert Kilometer, Wochen bis Monate), die Mesoskala (interne Wellen, Gezeiten-, Trägheitsschwingungen etc., mehrere Kilometer bis Meter, Wochen bis Tage) und die Mikroskala (Meterbereich, Minuten bis Sekunden). Diese Skalen werden bestimmt durch die Dominanz verschiedener Prozesse an der Zirkulation (DIETRICH u. a. [9]).

Entsprechend dieser Einteilung werden auch numerische Modelle nach diesen Raum- und Zeitskalen klassifiziert, z.B. globale Zirkulationsmodelle oder wirbelauflösende Modelle (NIHOUL u. JAMART [17]). Man entscheidet sich also mit der Wahl des Modells für die Darstellung eines bestimmten Bereichs der Zirkulation. Prozesse mit Skalen kleiner der gewählten Raum-/Zeitskalen fallen damit durch die „Maschen“.

Modelle stellen je nach Fragestellung damit nur Teilbereiche der Realität dar. Andererseits liegt hierbei auch ein großer Vorteil, denn durch die Wahl der Raum-/Zeitskalen und durch gezieltes „An“- bzw. „Abschalten“ bestimmter Terme der Ausgangsgleichungen läßt sich die Relevanz verschiedener Prozesse und auch ihrer Wechselwirkungen bei speziellen Fragestellungen bestimmen. Ergebnisse aus numerischen Modellen müssen immer unter diesem Aspekt gesehen werden.

Der Transport und die Ausbreitung von Stoffen im Meer wird in erster Linie durch die Strömungen bestimmt. Physikalische, chemische und biologische Prozesse im Meer als auch im Sediment modifizieren die Ausbreitung dann entscheidend. Transportmodelle beschreiben heute den advektiven und diffusiven Anteil sowie physikalisch hervorgerufene Vertikalbewegungen recht gut (HAINBUCHER u. a. [12]). Schwierig gestaltet sich die Einbindung chemischer und biologischer Prozesse in diese Modelle. Einerseits ist das Wissen über diese komplexen Vorgänge und ihre Wechselwirkungen noch nicht ausreichend, und andererseits lassen sich diese Prozesse nicht unbedingt durch mathematische Gleichungen beschreiben oder parametrisieren (MOLL [16]).

Gleichgültig ob Zirkulations- oder Transportmodell, die Qualität der numerischen Ergebnisse hängt außerdem stark von der Güte der Eingangsdaten ab, die die Prozesse im Modell antreiben (Topographie, Wind, Salzgehalt, Temperatur etc.). Insbesondere Daten über Eintragshöhe und Schwankungsbreite von Schadstoffeinträgen durch Flüsse und Atmosphäre sind nur schwer zu beschaffen. Kontinuierliche Messungen liegen hier meist nur über kürzere Zeiträume vor. Daher muß auch in den hier vorgestellten Simulationen auf mittlere Eintragsgrößen zurückgegriffen werden.

## 4 Modellkonzept

### 4.1 Das Zirkulationsmodell

Das Zirkulationsmodell (globales Schelfmeermodell) ist ein dreidimensionales, baroklines Modell, basierend auf den primitiven Gleichungen, die mit einem semiimpliziten numerischen Schema gelöst werden (BACKHAUS [1]). Letzteres hat den Vorteil, daß man unabhängig von den für explizite Verfahren geltenden Stabilitätskriterien den Zeitschritt nach physikalischen Gesichtspunkten wählen kann. Mit Rücksichtnahme auf die Auflösung der Gezeit wurde für die hier gezeigten Fälle mit einem Zeitschritt von ca. 20 min gerechnet.

Der meridionale Abstand des sphärischen Modellgitters beträgt 12 min (ca. 20 km) und der longitudinale Abstand 20 min. Die Modellregion umfaßt die Nordsee, angrenzende Schelfregionen und Teile des tiefen Ozeans. In der Verti-

kalen wird das Modell durch mehrere Schichten aufgelöst, wobei im Sommer die Anzahl der Schichten größer als im Winter ist. Auf diese Weise wird im Falle barokliner Simulationen dem zunehmenden Einfluß der vertikalen Schichtung auf die Zirkulation im Sommer Rechnung getragen.

Mit Ausnahme der Strömungs- und Wasserstandsdaten, die als Eingangsdaten für die Simulationen des atmosphärischen Eintrags in die Nordsee dienten (s. Danksagung am Ende des Textes), wurden alle hier verwendeten Zirkulationsdaten mit diesem Modell erstellt. Das Zirkulationsmodell, das das Transportmodell für die Ausbreitung des atmosphärischen Eintrags in die Nordsee antreibt, ist eine Weiterentwicklung des oben beschriebenen Modells. Es verbessert durch eine veränderte Beschreibung des vertikalen Impulstransfers bzw. Parametrisierung des vertikalen Austauschcoeffizienten und durch die Vorgabe direkten thermischen Forcings die Darstellung vertikaler, thermischer Schichtung im Modell (POHLMANN [18]).

## 4.2 Das Transportmodell

Für die Simulation der Ausbreitung passiver, konservativer Tracer, die durch Punktquellen (Flüsse) eingetragen wurden, wurde ein einfaches Transportmodell benutzt (HAINBUCHER u. a. [12]). Dieses Modell berücksichtigt allein die Advektion der Teilchen. Die Berechnungen wurden mit Hilfe von Lagrangeschen Trajektorien durchgeführt. Das Modell ist zweidimensional, und die horizontale Gitterauflösung entspricht der Auflösung des Zirkulationsmodells. Der Zeitschritt des Modells umfaßt 2 Stunden.

Das Modell wird mit den Ergebnissen (Strömungskomponenten, Wasserstand) des Zirkulationsmodells betrieben. Die Strömungsinformation wurde hierzu vertikal integriert. Es sei an dieser Stelle erwähnt, daß sich die vertikal integrierte Information eines dreidimensionalen Zirkulationsmodells stark von den Ergebnissen eines zweidimensionalen Modells unterscheidet (BACKHAUS u. a. [5]). Dies trifft insbesondere auf die dichtebedingte Strömung und die Approximation der Bodenreibung zu.

Für die Punktquellen ist es ausreichend, pro Zeitschritt jeweils ein Teilchen zu emittieren, da allein die Advektion betrachtet wird. Die tägliche Position jedes eingeleiteten Teilchens wird über den Zeitraum von 2 Jahren gespeichert. Dies entspricht in etwa der Zeit, die ein Teilchen braucht, um die Nordsee zu verlassen. Mit Hilfe dieser gespeicherten Information ist es möglich, zu jedem Zeitpunkt des Simulationszeitraums die Teilchenkonzentration in der Nordsee für einzelne Quellen oder auch für die Summe mehrerer Quellen zu ermitteln.

Im Falle der flächendeckenden atmosphärischen Einleitung wurde auf die Daten des erweiterten Zirkulationsmodells zurückgegriffen. Das Transport-

modell selbst ist ein Eulersches Modell, das sowohl auf der Advektions- als auch Diffusionsgleichung basiert. Der Eintrag erfolgt über die gesamte Wasseroberfläche konstant während des gesamten Simulationszeitraums. Auch hier handelt es sich wieder um passive, konservative Tracer, d. h., sie wirken nicht auf die Strömung ein und reagieren nicht infolge chemischer oder biologischer Prozesse.

## 5 Daten

### 5.1 Strömungs- und Wasserstandsdaten

Für die Berechnung der Trajektorien der gezeitenbedingten Restströmung, der mittleren dichtebedingten Strömungen, der mittleren windbedingten Strömungen und für die Darstellung der gezeitenbedingten Wasserstandsschwankungen (s. Danksagung am Ende des Textes) wurden mit dem o. g. Zirkulationsmodell (Kap. 4.1) Simulationen durchgeführt. Entsprechend der Fallunterscheidungen wurde das Modell nur mit dem relevanten Prozeß (z. B. halbtägige Mondtide [ $M_2$ -Gezeit], mittlerer Südwestwind etc.) angetrieben.

Die Luftdruck- und Strömungsdaten zur zeitabhängigen windgetriebenen Strömung und zur Ausbreitung des atmosphärischen Eintrags ist eine Auswahl aus einem umfangreichen Datensatz, der im Projekt PRISMA erstellt wurde und mehrere Jahre umfaßt (LUTHARDT [15], POHLMANN [19]). Der ausgewählte Zeitraum für diese Animationen ist der Oktober 1988, der sich durch eine hohe atmosphärische Variabilität auszeichnet. Für die Simulationen wurde das erweiterte Zirkulationsmodell verwendet. Die Rechnungen dienten der Analyse des Einflusses der thermischen Schichtung auf die Zirkulation der Nordsee.

Die Strömungsdaten zur Ausbreitung der Einträge durch Flußquellen wurden im Projekt ZISCH erstellt. Die Simulationen umfassen einen Zeitraum von 14 Jahren (Oktober 1968 bis Dezember 1986) und wurden mit dem o. g. Zirkulationsmodell (BACKHAUS [1]) durchgeführt. Das Modell wurde angetrieben mit hochaufgelösten (6stündig, 150 km) Luftdruck- und Windstrefsfeldern (BACKHAUS u. a. [3]) sowie der  $M_2$ -Gezeit und einer diagnostisch vorgegebenen Sommer- bzw. Winter-Dichteverteilung. Der Zweck dieser Simulationen war, eine Abschätzung der niederfrequenten Variabilität der Zirkulation der Nordsee zu erhalten (HAINBUCHER u. a. [11], BACKHAUS u. HAINBUCHER [4]).

### 5.2 Ausbreitungsdaten

Wie bereits die Strömungsdaten wurden auch die Daten zur Ausbreitung von Flußeinträgen im Projekt ZISCH erstellt (HAINBUCHER u. a. [12]). Der Datensatz

umfaßt den Zeitraum von 1969 bis 1982. Berücksichtigt wurden bei diesen Rechnungen die Einträge von 6 Flüssen. Die Höhe der Einträge der einzelnen Flüsse wurde entsprechend ihrem mittleren Anteil gewichtet, der sich aus den Eintragsraten für die wichtigsten Schadstoffe ergibt (Deutsches Hydrographisches Institut [10]). Es ergibt sich damit folgende Relation:

Fluß	Rhein	Elbe/ Weser	Tyne	Firth of Forth	Themse	Humber
Gewichtung	1,0	0,36	0,12	0,12	0,08	0,06

Über den gesamten Simulationszeitraum bleiben diese gewichteten Einträge konstant. Dies wie überhaupt die Vorgabe eines gewichteten Mittels entspricht zwar nur sehr eingeschränkt der Realität, ist aber aus Ermangelung zeitabhängiger Eintragsdaten über den Zeitraum von 1969–82 für alle Quellen die einzig mögliche Alternative.

Die Daten wurden mit dem zweidimensionalen Lagrangeschen Transportmodell erstellt. Es sei darauf hingewiesen, daß sich die Ausbreitung unter dreidimensionalen Bedingungen sicherlich in den unterschiedlichen Schichten voneinander unterscheidet (dichtebedingt, Bodenreibung, Ekman-Spirale etc.). Für einen ersten qualitativen Überblick über mögliche Transportwege von Partikeln in der Nordsee erschien uns jedoch die vertikal integrierte Information aufgrund der komprimierten Datenmenge geeigneter.

Im Falle der Ausbreitung von atmosphärischem Eintrag über die Jahre 1987 bis 1989 wurde das dreidimensionale Eulersche Transportmodell verwendet. Diese Rechnungen wurden ausgeführt, um in erster Näherung einerseits die Verteilung atmosphärisch eingetragenen Bleis innerhalb der Wassersäule und andererseits den Sauerstoffhaushalt zu untersuchen (POHLMANN, pers. Mitt.).

### Zur Entstehung des Films

Mit Ausnahme der Realaufnahmen, die vom IWF erstellt wurden, basiert der Film auf computergenerierten Bildsequenzen, die im Projekt VISIMAR am Institut für Meereskunde (IfM) der Universität Hamburg erzeugt wurden. Zur Produktion solcher Animationen existiert am IfM eine Aufnahmeeinrichtung. Das Gerätekonzept sowie die Software zur Kommunikation der einzelnen Hardware-Elemente untereinander wurde von dem deutschen VISIMAR-Partner, der Firma caitec computer systems, entwickelt.



## Filmbeschreibung

### Wortlaut des gesprochenen Kommentars<sup>1</sup>

Mehr als  $\frac{2}{3}$  unseres Planeten sind mit Wasser bedeckt. Den Hauptnutzen aus dem Meer bezieht der Mensch jedoch nicht aus den tiefen Ozeanen, sondern aus den wesentlich flacheren und biologisch weitaus produktiveren Schelfmeeren, die weniger als 5% der Fläche des Weltozeans einnehmen. Am Beispiel der Nordsee werden die Ursachen für die Ausbreitung mariner Umweltverschmutzung betrachtet.

Die mittlere Tiefe der Nordsee beträgt etwa 80 m. Der südliche Teil und die kontinentalen Küstenbereiche sind mit Tiefen bis maximal 50 m besonders flach. Links erkennt man den Abbruch der Schelfkante zum Norwegischen Becken. Entlang der norwegischen Küste zieht sich die Norwegische Rinne mit Tiefen über 700 m im Skagerrak.

Die gezeigten Computeranimationen und Grafiken beruhen auf Daten aus numerischen Simulationsmodellen, die mit realen Meßdaten versorgt werden.

### *Strömungen*

Die Strömungen, die für die Verfrachtung von Substanzen verantwortlich sind, werden durch eine Vielzahl von Prozessen angetrieben. Einer dieser physikalischen Prozesse ist die Gezeit.

### *Gezeit*

Die Gezeit, an der Küste als halbtägig auftretendes Niedrig- und Hochwasser beobachtbar, breitet sich über den gesamten Ozean als eine lange Welle aus. In der Nordsee läuft die Gezeitenwelle aus dem Atlantik im Norden und über den Englischen Kanal im Süden ein. Das Niedrigwasser, hier blau, und das Hochwasser, hier rot markiert, verteilen sich während einer Gezeitenperiode über die gesamte Nordsee. Infolge der Erdrotation sind Hoch- und Niedrigwasser nicht gleichmäßig räumlich verteilt. Die höchsten Amplituden treten an der Küste auf.

An einer Tidenkurve – für einen Tag, an einem ausgewählten Ort – läßt sich zeigen, daß die Gezeit von einer sinusförmigen Funktion abweicht. Dieses Abweichen hat zur Folge, daß ein während der Flutphase transportiertes Teilchen in der Ebbphase nicht wieder an seinen Ausgangspunkt zurückgelangt. Es verbleibt eine Restströmung.

---

<sup>1</sup> Die *kursiv* gesetzten Texte entsprechen den Zwischentiteln im Film. – Die eingerückten Abschnitte im Kleindruck geben zusätzliche Informationen.

Grund der Abweichung von der Sinusform hier ist das Vorhandensein verschiedener Partialtiden und der Bodenreibung.

Diese Restströmung kann mit Hilfe von Trajektorien dargestellt werden. An verschiedenen Stellen der Nordsee werden im Modell Drifter plaziert, deren Wege verfolgt und auf einer Karte markiert. Die Bahnen der Drifter, die Trajektorien, sind für ein bestimmtes Zeitintervall nicht immer gleich lang. Je länger die Trajektorie, desto stärker die Strömung.

Die Trajektorien für die gezeitenbedingte Restströmung sind so gewählt, daß ihre Bahnen einen Zeitraum von 12 Tagen umfassen. Der gesamte gezeigte Zeitraum entspricht einem Monat. Die Restströmung der Gezeit ist viel kleiner als die mit Ebbe und Flut verbundenen Strömungen. Insgesamt ergibt sich eine zyklonale, eine linksdrehende Strömung.

Die Gezeitenberechnungen beinhalten für den gesamten Film nur eine der Partialtiden, die  $M_2$ -Gezeit. Dieser Anteil ist in der Nordsee überwiegend (DIETRICH u. a. [9]). Die Restströmung wurde entsprechend der Formulierung in DICK und SOETJE [8] berechnet und ist Folge der wirkenden Bodenreibung.

### *Dichtebedingte Strömungen*

Unterschiedliche horizontale und vertikale Salzgehalt- und Temperaturverteilungen führen zu unterschiedlich dichtem Wasser im Meer.

#### *Salzgehalt Oberfläche*

Eine der ausgeprägtesten zeitlichen Änderungen des Salzgehalts und der Temperatur ist der Jahresgang. Rote Farben zeigen hohe, blaue Farben niedrige Werte an. Der Anteil des Salzgehalts an der Dichte ist entscheidend für die horizontale, großräumige Strömungsverteilung in der Nordsee.

Generell erkennt man in den Küstenregionen niedrige Salzgehalte, die dann von den Küsten weg stark zunehmen. Ursache hierfür ist die Frischwasserzufuhr durch die Flüsse. Auch im Bereich der Norwegischen Rinne finden wir an der Oberfläche geringe Salzgehalte vor. Dieses ist eine Folge des Einstroms salzarmen Ostseewassers und auch der Frischwasserzufuhr durch die vielen Fjorde. Die nördliche Nordsee und der Englische Kanal sind gekennzeichnet durch Atlantikwasser, das sich in der zentralen Nordsee mit dem Küstenwasser vermischt. Der Unterschied zwischen Sommer und Winter besteht im wesentlichen darin, daß sich die Linien gleichen Salzgehalts bzw. die Salzgehaltsgradienten verlagern. Im Winter dringt das Atlantikwasser weiter in die Nordsee vor.

#### *Temperaturverteilung Oberfläche*

Die jahreszeitliche Temperaturverteilung erklärt sich aus der Tiefenverteilung in der Nordsee. Die flachen Küstengewässer lassen sich stärker und schneller aufheizen bzw. abkühlen als die tieferen Gewässer.

### *Temperaturverteilung Sommer*

Die Erwärmung an der Oberfläche sorgt im Sommer für ein ausgeprägtes Temperaturprofil. Das Wasser im zentralen und nördlichen Bereich der Nordsee bleibt aufgrund der Tiefe sehr viel kälter. Die zweigeschichtete Temperaturverteilung führt zu einem vertikalen Dichtesprung, der in weiten Teilen der Nordsee eine Entkopplung der Oberfläche von tieferen Wasserschichten verursacht und somit den Austausch der Wassermassen vermindert.

Natürlich verändert sich die horizontale Verteilung vom Sommer zum Winter allmählich und auch nicht jedes Jahr auf gleiche Weise. Unsere hier dargestellten Salzgehalte sind jeweils ein Mittel über den Winter- bzw. Sommerzeitraum mehrerer Jahre. Die Schwankungen dieser Mittel sind im Verhältnis zu anderen Signalen, z. B. dem Wind, klein. Deshalb nehmen wir hier die Sommer- und die Winterverteilung als zeitlich konstante Prozesse für den Sommer bzw. den Winter an.

### *Wind*

Der atmosphärische Antrieb dominiert die Strömungen in der Nordsee, insbesondere in den oberflächennahen Schichten. Die über dem Meer vorherrschende Windlage ist der Südwestwind. Die Bahnen der Trajektorien sind auch hier 12 Tage lang, der betrachtete Zeitraum entspricht einem Monat.

Diese mittlere Windlage sorgt für einen optimalen Wassermassenaustausch mit dem Atlantik. Der Einstrom von Atlantikwasser über den Englischen Kanal und der Ausstrom von Nordseewasser über die Norwegische Rinne werden durch diese Windlage unterstützt. Kontaminierte Wassermassen bleiben im Mittel nicht länger als 2 bis 3 Jahre in der Nordsee.

Andere, länger anhaltende Windlagen, z. B. die Nordostwindlage, ergeben ein völlig anderes Strömungsbild. Die Trajektorien wandern nun genau entgegen jener der mittleren Südwestwindlage. Der Wassermassenaustausch mit dem Atlantik wird dadurch verschlechtert.

Die Auswirkungen mittlerer Windlagen auf den Wassermassenaustausch in der Nordsee wird in BACKHAUS u. a. [2] ausführlich behandelt.

### *Summe der Antriebe*

In der Natur wirken Gezeit, die Dichte und der Wind gemeinsam auf die Strömungen. Wir sehen hier die resultierende Strömung an der Oberfläche. Die Bahnen der Trajektorien sind diesmal nur 6 Tage lang.

Im zentralen und südlichen Bereich der Nordsee zeigt sich ein zyklonales Strömungsmuster mit dem Einstrom von Atlantikwasser im Englischen Kanal.

Entlang der südlichen Begrenzung des Norwegischen Grabens, der 200-m-Linie, haben wir infolge der Dichte ebenfalls einen Einstrombereich. Andeutungsweise kann man im nördlichen Bereich des Grabens die Ausstromregion erkennen. Im Skagerrak liegt dagegen eine Wirbelregion vor. Auch dieser Wirbel ist dichtegetrieben.

In einem tieferen Horizont der Nordsee sind die Strömungsbeiträge deutlich geringer als an der Oberfläche, insbesondere im zentralen Bereich. Das hat 2 Gründe: Zum einen nimmt der Windeinfluß exponentiell mit der Tiefe ab, zum anderen verstärkt die thermische Sprungschicht diese Abnahme. Die Summe der betrachteten Antriebe sorgt für einen optimalen Wassermassenaustausch mit dem Atlantik.

### *Variabilität der Strömungen*

Die Betrachtung mittlerer Zustände für die Ausbreitung von Stoffen allein ist jedoch nicht ausreichend. Die Luftdruckverteilung für einen ausgewählten Monat spiegelt die Variabilität des Wetters wieder. Rot kennzeichnet Hochdruck-, Blau Tiefdruckgebiete. Die raschen Wetteränderungen wirken sich sehr deutlich auf die Strömungsverhältnisse aus.

Die Variabilität der atmosphärischen Anfachung ist für die Nordsee von besonderer Bedeutung. Das flache Schelfmeer reagiert nahezu ohne Verzögerung auf diesen Einfluß. Für die Nordsee ist es daher zwingend erforderlich, diese Veränderlichkeit bei der Ausbreitung von wassergelösten Stoffen zu betrachten.

Die hohe Variabilität des Wetters zeigt sich hier in den häufigen und raschen Richtungsänderungen der Trajektorien. Die Bahnen der Trajektorien sind diesmal nur 3 Tage lang.

### *Ausbreitung gelöster Stoffe*

Stoffe können aus den unterschiedlichsten Quellen ins Meer gelangen. Wir wollen uns exemplarisch mit dem Eintrag aus Flüssen beschäftigen. Auf dieser Satellitenaufnahme sehen wir rechts – gelb und rot gefärbt – den Eintrag der Elbe. Von den vielen Flüssen, die in die Nordsee münden, betrachten wir nur die größten. Auf der kontinentalen Seite: Rhein, Elbe und Weser; auf britischer Seite: Themse, Tyne, Humber und Firth of Forth.

Die Flüsse verfrachten nicht alle die gleiche Menge an Stoffen. Die stärksten Quellen sind der Rhein und die gemeinsame Quelle Elbe/Weser. Die Substanzen, die wir einleiten wollen, sind fiktiv.

D.h., wir beziehen uns nicht auf einen bestimmten Stoff, sondern die Eintragsmengen sind ermittelt aus der Summe vieler Stoffe und die Eintragungshöhen entsprechen nicht absoluten Zahlen.

Verfolgen wir zunächst den Eintrag von nur 2 Quellen, der Mündung des Firth of Forth und der Elbe/Weser. Dieses Vorgehen erlaubt eine generelle Unterscheidung, welche Bereiche der Nordsee von kontinentalen Quellen und welche Bereiche von britischen Quellen erreicht werden. Der betrachtete Zeitraum umfaßt 13 Jahre.

Betrachten wir nun die Überlagerung aller 6 Flüsse. Am auffälligsten sind die vielen wetterbedingten Rückstrom- und Stagnationsereignisse. Letztere werden besonders im Sommer durch langanhaltende Ostwindlagen erzeugt.

Die erhöhte Konzentration im Bereich des Skagerraks ist eher unrealistisch und läßt sich einerseits aus dem reduzierten, zweidimensionalen Strömungsfeld und andererseits aus der Annahme eines konstanten Einstroms von Ostseewasser als Randbedingung am östlichen, offenen Modellrand bei den Zirkulationssimulationen erklären.

Das Zusammenwirken von Dynamik und Flußeinträgen zeigt sich in der mittleren Stoffverteilung der Nordsee.

Mittelwert über die gezeigten 13 Jahre.

Die asymmetrische Konzentrationsverteilung weist die höchsten Werte im Bereich der kontinentalen Küsten auf. Gleiches gilt für die wetterbedingte Veränderlichkeit der Konzentration, die hier als Standardabweichung ausgedrückt wird. Sie ist von gleicher Größenordnung wie das Mittel. Das bedeutet, daß insbesondere an den Küsten mit hohen Spitzenbelastungen gerechnet werden muß.

#### *Eintrag aus der Atmosphäre*

Aus der Atmosphäre werden Stoffe nicht punktuell eingetragen, wie aus den Flüssen, sondern über den gesamten Bereich der Nordsee. Auch hier variieren die Einträge räumlich und zeitlich.

Wobei auch diesmal die zeitliche Variabilität der Quelle infolge mangelnder Datendichte nicht in Betracht gezogen wird.

Wir betrachten die vertikale Ausbreitung und legen dazu einen Schnitt quer durch die Nordsee.

Der betrachtete Eintrag erfolgt über 3 Jahre und ist überall gleich groß. In den flachen Regionen zeigen sich deutlich höhere Konzentrationen. Die jeweils

gleich großen Eintragungsmengen verteilen sich in tiefen Schichten über eine größere Wassersäule. In den Sommermonaten läßt sich in den tieferen Schichten eine Konzentrationserhöhung feststellen. Dies ist die Folge der starken thermischen Schichtung. Im Winter dagegen haben wir kaum vertikale Konzentrationsgradienten. In den flachen Regionen ist die Konzentration ganzjährig über die Wassersäule homogen verteilt. Hier sorgen Gezeiten- und Bodenturbulenz für eine gute Durchmischung.

Am Beispiel der Nordsee wurden die Ursachen jener Meeresströmungen studiert, die zur Ausbreitung im Meere gelöster Stoffe führen. Die stark veränderliche Dynamik des Meeres führt dazu, daß die Ausbreitung von Stoffen eine ähnlich hohe Dynamik aufweist. Insbesondere wurde gezeigt, daß Stagnationsereignisse der Strömungen oder gar deren vollständige Richtungsumkehr zu hohen Belastungen der marinen Umwelt führen können. Es wäre daher unzulässig, nur von einer mittleren Belastung des Meeres zu sprechen, da dynamisch bedingte Spitzenbelastungen sehr häufig auftreten.

## Bibliographie

- [1] BACKHAUS, J.O.: A Three-Dimensional Model for the Simulation of Shelf Sea Dynamics. Dt. Hydrograph. Z. **38** (1985), 165–187.
- [2] BACKHAUS, J.O., J. BARTSCH, P. DAMM, D. HAINBUCHER, T. POHLMANN und C. SCHRUM: Das Wetter in der Nordsee. In: THIEL [23], 85–94.
- [3] BACKHAUS, J.O., J. BARTSCH, D. QUADFASEL und J. GUDDAL: Atlas of Monthly Surface Fields of Air Pressure, Wind Stress and Wind Stress Curl Over the North East Atlantic Ocean: 1955–1982. Inst. Meereskunde, Univ. Hamburg, Technic. Rep. No. **85–3** (1985).
- [4] BACKHAUS, J. O., und D. HAINBUCHER: A Finite Difference General Circulation Model for Shelf Seas and Its Application to Low Frequency Variability on the North European Shelf. In: NIHOUL und JAMART [17], 221–244.
- [5] BACKHAUS, J.O., T. POHLMANN und D. HAINBUCHER: Regional Aspects of the Circulation on the North European Shelf. ICES, C. M. 1986/C:38.
- [6] BECKER, G. A. (Hrsg.): Stoffausbreitung in der Nordsee. Dt. Hydrograph. Inst., Meereskundl. Beobacht. u. Ergeb. Nr. **61** (1987).
- [7] DANNEKER, W., H. HINZPETER, M. KRIEWS, K. NAUMANN, M. SCHULZ, M. SCHWIKOWSKI, M. STEIGER, U. TERZENBACH und P. KIRZEL: Atmospheric Transport of Contaminants, Their Concentrations and Input Into the North Sea. In: SÜNDERMANN [22].
- [8] DICK, S., und K.C. SOETJE: Ein operationelles Ölausbreitungsmodell für die Deutsche Bucht. Dt. Hydrograph. Z., Ergänzungsh. Reihe A, Nr. **16** (1990).
- [9] DIETRICH, G., K. KALLE, W. KRAUSS und G. SIEDLER: Allgemeine Meereskunde. Berlin 1975.
- [10] Deutsches Hydrographisches Institut: Gütezustand der Nordsee. Meereskundl. Beobacht. u. Ergeb. Nr. **55** (1984).

- [11] HAINBUCHER, D., J.O. BACKHAUS und T. POHLMANN: Atlas of Climatological and Actual Seasonal Circulation Patterns in the North Sea and Adjacent Shelf Regions: 1969–1981. Inst. Meereskunde, Univ. Hamburg, Technic. Rep. No. 86–1 (1986).
- [12] HAINBUCHER, D., T. POHLMANN und J.O. BACKHAUS: Transport of Conservative Passive Tracers in the North Sea: First Results of a Circulation and Transport Model. *Continental Shelf Research*. Vol. 7, No. 10. 1987, 1161–1179.
- [13] HANSEN, W.: Die Ermittlung der Gezeiten beliebig gestalteter Meeresgebiete mit Hilfe des Randwertverfahrens. *Dt. Hydrograph. Z.* 1 (1948), 157–163.
- [14] HANSEN, W.: Die Reproduktion der Bewegungsvorgänge im Meer mit Hilfe hydrodynamisch-numerischer Verfahren. *Mitt. Inst. Meereskunde, Univ. Hamburg*, 5 (1966).
- [15] LUTHARDT, H.: Analyse der wassernahen Druck- und Windfelder über der Nordsee aus Routinebeobachtungen. *Hamburger Geophysikal. Einzelschr. A*, 83 (1987), 1 bis 115.
- [16] MOLL, A.: Simulation der Phytoplanktondynamik für die zentrale Nordsee im Jahresverlauf. Univ. Hamburg, Inst. Meereskunde, Diplomarbeit, 1988, 141 S.
- [17] NIHOUL, J. C. J., und B. M. JAMART (Hrsg.): *Three-Dimensional Models of Marine and Estuarine Dynamics*. Amsterdam 1987.
- [18] POHLMANN, T.: Untersuchung hydro- und thermodynamischer Prozesse in der Nordsee mit einem dreidimensionalen numerischen Modell. *Ber. Zentrum Meeres- u. Klimaforsch. Univ. Hamburg*, Nr. 23 (1991).
- [19] POHLMANN, T.: Predicting the Thermocline in a Circulation Model of the North Sea – Part I: Model Description, Calibration and Verification (im Druck).
- [20] REID, R. O. (Hrsg.): *Numerical Models of Ocean Circulation*. Washington, D. C., 1975 (Nat. Acad. Sci.).
- [21] ROACHE, P. J.: *Computational Fluid Dynamics*. Albuquerque, New Mexico, 1982.
- [22] SÜNDERMANN, J. (Hrsg.): *Circulation and Contaminant Fluxes in the North Sea*. Heidelberg 1994.
- [23] THIEL, H. (Hrsg.): *Kurs Nord, Meeresforschung mit Valdivia*. Hamburg 1991.

## Danksagung

Für die Bereitstellung von Daten und Ideen zum Filmkonzept möchten wir folgenden Mitarbeitern am Institut für Meereskunde, Universität Hamburg, danken: Herrn T. Pohlmann, P. Damm und Frau C. Schrum für die Bereitstellung der Daten aus dem Projekt PRISMA; Herrn D. Grawunder und J. Gavinho für die Bereitstellung des Datensatzes der Welttopographie aus dem Projekt SFB 318; Herrn J. Bartsch und P. Damm für die Bereitstellung der mittleren Temperatur- und Salzgehaltendaten.

Frau P. Funk, Fachhochschule für Vermessungswesen/Hydrographie, Hamburg, sei Dank für die Bereitstellung der Pegeldata Hamburg. Für die technische Unterstützung bei der Produktion der einzelnen Animationen und bei auftretenden Hardware- und Software-Problemen danken wir unseren technischen Mitarbeitern Herrn M. Gerda, F.N. Yildirim und der Firma caitec computer systeme.

Das dieser Veröffentlichung zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 03F0521A (VISIMAR) gefördert.

## **Angaben zum Film**

Video (Komm., deutsch), farbig, 17 min. Hergestellt 1992/1993, veröffentlicht 1993.

Der Film ist für die Verwendung in Forschung und Hochschulunterricht bestimmt. Die Aufnahmen entstanden unter der Leitung von D. HAINBUCHER und J.O. BACKHAUS, Institut für Meereskunde, Hamburg. Computeranimation: M. GERDAN und D. HAINBUCHER. Bearbeitet und veröffentlicht durch das Institut für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen, E. KÖPP; Kamera: G. MATZDORF; Schnitt: C. JAEKEL.

## *Inhalt des Films*

**Strömungen und Ausbreitung von gelösten Stoffen in der Nordsee.** Die für die Ausbreitung von passiven, konservativen Teilchen maßgeblichen physikalischen Prozesse – gezeitenbedingte Restströmung, dichtebedingte und atmosphärisch angefahte Strömungen – werden am Beispiel der Nordsee erklärt. Über einen Zeitraum von 13 Jahren ist der Eintrag aus Flüssen dargestellt. Es ergibt sich eine asymmetrische Verteilung der Teilchenkonzentration mit Spitzenwerten in den Küstenbereichen als Resultat der mittleren Strömung. Eine starke vertikale Schichtung wird verursacht durch die hohe Variabilität und sommerliche Entkopplung der Oberflächendichte in großen Teilen der Nordsee. Computersequenzen basieren auf numerischen Simulationsmodellen, die mit realen Meßdaten gespeist wurden.

## *Film Summary*

**Currents and Dispersion of Dissolved Matter in the North Sea.** The most important physical processes that influence the dispersion of passive, conservative particles – tidally determined residual currents, density related and atmospherically caused currents – are explained taking the North Sea as an example. The influx brought by rivers over a period of 13 years shows an asymmetrical distribution of particle concentrations with peak values in coastal areas as a result of the mean current. A strong vertical stratification is caused by the high variability and seasonal decoupling of the surface density, occurring in many parts of the North Sea. Computer sequences are based on numerical simulation models using real measurement data.

## *Résumé du Film*

**Courants et propagation de substances résolues dans la Mer du Nord.** On explique les processus physiques responsables pour la propagation de particules passives conserva-



trices — comme flux restants de la marée, courants dûs à la densité ou courants stimulés par l'atmosphère — en prenant comme exemple la Mer du Nord. On illustre l'apport des fleuves pendant une durée de 13 ans. Il en résulte une distribution asymétrique de la concentration des particules: la plus élevée se situe dans la région des côtes et est due au courant médian. On observe une disposition par couches verticales remarquable qui est due à la variabilité énorme et au découplage estival de la densité superficielle sur de grandes parties de la Mer du Nord. Les séquences de l'ordinateur se basent sur des modèles numériques de simulation alimentés avec des données de mesures réelles.