

# **Modellierung von Schwebstofftransporten in Nordsee und Ostsee**

Autoren:

Gerhard Gayer

Stephan Dick

Andrei Pleskachevsky

Wolfgang Rosenthal

**Berichte des  
Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie  
Nr. 36/2004**



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Berechnung von Schwebstoffaustauschprozessen</b>	<b>5</b>
2.1	Modellphilosophie	6
2.2	Sedimentation, Resuspension und Erosion (Austausch zwischen Boden und unterster Wasserschicht)	7
2.3	Bodenprozesse	10
2.4	Vertikaler Austausch in der Wassersäule	11
2.5	Sinken des Schwebstoffs	12
2.6	Berechnung der horizontalen Schwebstoffverteilung	12
2.7	Berechnung der Schwebstoffeinträge an Kliffs	12
<b>3</b>	<b>Sedimentverteilung am Meeresboden und fluviale Schwebstoffeinträge</b>	<b>13</b>
3.1	Digitale Schwebstoffverteilungskarten des Meeresbodens	13
3.2	Flusseinträge von Schwebstoffen	15
<b>4</b>	<b>Szenarienrechnungen und Fallstudien</b>	
4.1	Großräumige Ausbreitungssimulationen	19
4.1.1	Berechnung von Schwebstoffkonzentrationen im Januar/Februar 2000	19
4.1.2	Berechnung von Schwebstoffkonzentrationen im Winter 2000/2001	23
4.2	Simulation kleinräumiger Prozesse (horizontale Advektion und vertikale Dispersion)	26
4.3	Simulation eines Schwebstoffeintrags durch die Elbe	31
4.4	Fallstudie zur Ausbreitung von Baggergut	33
4.5	Simulation von fiktiven Unfallszenarien für an Schwebstoffe gebundene Schadstoffe	35

<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>Literatur</b>	<b>38</b>
	<b>Autoren</b>	<b>39</b>

## 1 Einführung

Die Kenntnis der Schwebstoffverteilung (SPM, suspended particulate matter) ist eine wichtige Voraussetzung, um den ökologischen Zustand der Nordsee beschreiben bzw. prognostizieren zu können. Die SPM-Konzentration im Wasser reguliert zum einen die Eindringtiefe des Lichts und ist damit ein Parameter, der die Primärproduktion des Planktons wesentlich beeinflusst. Zum anderen üben die Sedimente der Nordsee für die Nährstoffdynamik eine Pufferfunktion aus und stellen sowohl Quellen als auch Senken für Nährstoffe dar. Die Bestimmung der Ausbreitung des Schwebstoffs ermöglicht zudem Aussagen über den Verbleib von an partikulären Teilchen gebundenen Schadstoffen.

Deshalb wurde das BSH-Ausbreitungsmodell für gelöste konservative Stoffe (Müller-Navarra et al., 1999, Dick et al., 2001, Nies et al., 2003) um Modellkomponenten zur Berechnung der vertikalen Verteilung und horizontalen Ausbreitung von Schwebstoffen ergänzt.

Der vorliegende Bericht beschreibt zunächst die wichtigsten Prozesse, die für die Berechnung von Schwebstoffkonzentrationen von Bedeutung sind, sowie deren Umsetzung im Modell. Auf die Umsetzung der Advektion im Modell wird hier jedoch nicht näher eingegangen, da diese bei Kleine (1994) bereits ausführlich beschrieben ist. Im zweiten Teil des Berichts werden einige Fallbeispiele für typische Anwendungen im BSH vorgestellt.

In Kapitel 2 werden Modellansätze zur Beschreibung der SPM-Austauschprozesse (hervorgerufen durch Seegang und Strömung) sowie die notwendigen Eingabe-Informationen des SPM-Gehalts im Boden (Kapitel 3.1) und der Einträge durch die Flüsse (Kapitel 3.2) dargestellt. Kapitel 4 enthält qualitative und quantitative Untersuchungen zur Lage und Ausbreitung von Schwebstoffwolken, Simulation von kleinräumigen Prozessen und von fiktiven Unfallszenarien für an Schwebstoff gebundene Schadstoffe.

## 2 Berechnung von Schwebstoffaustauschprozessen

Als Grundlage zur Berechnung der Verteilung von partikulärem Material diente die bei der GKSS vorliegende Beschreibung und Formulierung der vertikalen Schwebstoff-Austauschprozesse, implementiert in einem quasi-3D Programm (Pleskachevsky et. al., 2001 und 2002).

Diese Prozesse beinhalten Erosion, Sedimentation, Resuspension, Diffusion und Bioturbation.

Die durch Strömung und Seegang bewirkten vertikalen Austauschprozesse im Boden und in der Wassersäule wurden in der neuen Subroutine ***spm*** des Euler'schen Ausbreitungsmodells des BSH zusammengefasst.

Vorbereitende Module enthalten die Initialisierung des Schwebstoffs im Boden und in der Wassersäule, die in dem erweiterten Vorprogramm ***konz\_init*** erfolgt, die Berechnung der benötigten Seegangparameter signifikante Wellenhöhe, Peak-Periode und mittlere Seegangsrichtung in der Subroutine ***wave***, Erosionsprozesse an den englischen Kliffs in der Subroutine ***cliff*** und Schwebstoff-Einträge durch die Flüsse in der Subroutine ***rand\_q***.

## 2.1 Modellphilosophie

Grundsätzlich erfolgt die Berechnung für 3 Schwebstoff Fraktionen, die sich durch ihre Sinkgeschwindigkeiten und ihre anteilmäßige Anfangsverteilungen unterscheiden.

Die Sinkgeschwindigkeiten dieser 3 Fraktionen wurden aus Messungen abgeleitet und gelten als typische Mittelwerte.

Mit Hilfe der SPM-Bodenbelegungskarte (siehe Kapitel 3) wird ein Anfangszustand für den Schwebstoffgehalt in 2 übereinander liegenden, anfangs je 10 cm dicken Bodenschichten erzeugt. Diese beiden Schichten sind in der folgenden Abbildung 1 durch **z3** und **z4** gekennzeichnet.

N		Schicht		Prozeß	
		Material	Schichtdicken		
1	oberste Wasserschicht	SPM-Konzentration $C_1$	$H_1$	Sinken ↓	← Transport → vertikaler Austausch ↑↓
k		$C_k$	$H_k$		
kb	unterste Wasserschicht	$C_{kb}$	$H_{kb}$	Sedimentation ↓	
z1	die obersten 20 cm des Boden	SPM Masse $M_1^B$	~ 0 - 1 mm	Resuspension ↑	Bioturbation ↓ Diffusion ↑↓
z2		SPM $M_2^B$ Sand	$h_{ero}$ (0 - 10 cm)	Erosion ↑	
z3		SPM $M_3^B$ Sand	10 cm- $h_{ero}$		
z4		SPM $M_4^B$ Sand	10 cm		

Abbildung 1: Schema der Austauschprozesse im Boden und in der Wassersäule.

Zusätzlich erfolgt eine tiefenabhängige Initialisierung des SPM-Gehaltes in der Wassersäule.

In Abhängigkeit von der durch Strömung und Seegang bewirkten Schubspannungsgeschwindigkeit erfolgt bei Überschreitung eines gewissen Grenzwertes Erosion, das heißt, aus der Bodenschicht **z3** wird bis zu einer Erosionstiefe  $h_{ero}$  Schwebstoff herausgelöst und in die Wassersäule verbracht. Diese zunächst leer geräumte Schicht ist mit **z2** gekennzeichnet.

In Abhängigkeit von der vertikalen Stromscherung und des tiefenabhängigen Seegangseinflusses erfolgt dort ein vertikaler Austausch und auf Grund ihrer Schwere ein Sinken der Teilchen.

Bei Unterschreitung eines weiteren Grenzwertes der Schubspannungsgeschwindigkeit sedimentiert der Schwebstoff aus der untersten Wasserschicht wieder und bildet die Bodenschicht **z1**. Ein Teil dieses Schwebstoffs wird durch Bioturbation in die darunter liegenden Bodenschichten verbracht, wo zusätzlich durch Dichte-Unterschiede bedingte Diffusion stattfindet.

Bei wieder größer werdender Schubspannung wird der Schwebstoff aus der Bodenschicht **z1** resuspendiert.

Zwischen den beiden Grenzwerten der Sedimentation und der Resuspension existiert ein kleiner Wertebereich, in dem Gleichgewicht herrscht, das heißt, dass kein Austausch zwischen Boden und Wassersäule stattfindet.

Ansätze zu einigen der im Folgenden näher beschriebenen Prozesse sind zu finden in Soulsby, 1997.

Nach der Berechnung der vertikalen Verteilung der SPM-Konzentrationen folgt der Strömungsbedingte horizontale Transport der entsprechenden Schwebstoffteilchen in der BSH-Subroutine **tflow**, in der auch die Schwebstoff-Einträge durch die Flüsse – eingelesen in der Subroutine **rand\_q** - berücksichtigt werden.

## 2.2 Sedimentation, Resuspension und Erosion (Austausch zwischen Boden und unterster Wasserschicht)

Im Vorprogramm **konz\_init** wird nach Einlesen der SPM-Bodenbelegungsprozentwerte der Schwebstoff, aufgesplittet nach 3 Fraktionen, auf die beiden Bodenschichten **z3** und **z4** verteilt. Fraktion 1 mit der Eigenschaft Sinkgeschwindigkeit = 0.0001 m/s hat dabei den größten Anteil. Fraktion 2 mit der Sinkgeschwindigkeit = 0.00002 m/s (im Wesentlichen fluviales SPM) ist die leichteste Fraktion (Verhältnis 1:9 zu Fraktion 1). Die schwerste Fraktion 3 mit der Sinkgeschwindigkeit = 0.001 m/s folgt einer sinusförmigen Verteilung in Abhängigkeit von den Prozentwerten der Bodenbelegung.

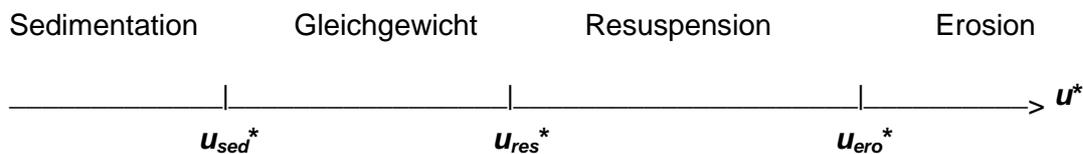
$$M^B_3 = \rho_{sed} \mu z_3 \quad , \quad M^B_4 = \rho_{sed} \mu z_4 \quad (1)$$

mit der Masse der SPM in der **k**-ten Bodenschicht  $M^B_k$  ( kg/m<sup>2</sup> ), dem prozentualer Anteil der SPM-Fraktion im Sediment  $\mu$  und der Dichte des Sediments  $\rho_{sed}$  (1200 kg/m<sup>3</sup>).

Sedimentation, Resuspension und Erosion werden in Abhängigkeit von  $u^*$ , der durch Strömung und Seegang bewirkten Schubspannungsgeschwindigkeit in der untersten Wasserschicht, berechnet.

Bei Überschreitung des Grenzwertes  $u_{ero}^*$  erfolgt Erosion bis zu einer Tiefe  $h_{ero}$ , anfangs aus der Bodenschicht **z3**, später auch aus der Schicht **z2** (in die zunächst leer geräumte Schicht **z2** mit der Schichtdicke  $h_{ero}$  wird später wieder Schwebstoff durch Bioturbation und Diffusionsprozesse verbracht).

Bei Unterschreitung des Sedimentationsgrenzwertes  $u_{sed}^*$  wird in Abhängigkeit von Schubspannungsgeschwindigkeit und SPM-Sinkgeschwindigkeit die Masse aus der Konzentration in der untersten Wasserschicht berechnet, die zu Boden sinkt und dort eine dünne Schicht **z1** bildet bzw. verstärkt. Bei Überschreitung des Grenzwertes  $u_{res}^*$  wird diese Schicht resuspendiert.



Die 3 Grenzwerte (mittlere Werte, aus Beobachtungen und Modell-Abgleich gewonnen) sind folgendermaßen belegt:

Sedimentation:  $u_{sed}^* = 0.0099 \text{ m/s}$   
 Resuspension:  $u_{res}^* = 0.0100 \text{ m/s}$   
 Erosion:  $u_{ero}^* = 0.0280 \text{ m/s}$

Die aktuelle **Schubspannungsgeschwindigkeit**  $u^*$  wird aus der maximal auftretenden Schubspannung  $\tau$  berechnet:

$$u^* = \sqrt{\tau/\rho}, \quad (\text{m/s}) \quad (2)$$

wobei  $\rho$  die mittlere Dichte des Wassers bedeutet ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ). Die **Schubspannung**  $\tau$  wird als Summe der durch Seegang und Strömung entstehenden Komponenten definiert:

$$\tau = \sqrt{(\tau_m + \tau_{wave} \cos \phi)^2 + (\tau_{wave} \sin \phi)^2} \quad (\text{kg/s}^2/\text{m}) \quad (3)$$

$\phi$  ist der Winkel zwischen Seegangs- und Strömungsrichtung und  $\tau_m$  die mittlere Schubspannung gemäß:

$$\tau_m = \tau_{cur} \left[ 1 + 1.2 \left( \frac{\tau_{wave}}{\tau_{cur} + \tau_{wave}} \right)^{3.2} \right] \quad (\text{kg/s}^2/\text{m}) \quad (4)$$

Die **Strömungskomponente**  $\tau_{cur}^*$  der Schubspannung wird berechnet mittels:

$$\tau_{cur} = \rho \cdot C_D \cdot \bar{U}^2 \quad (\text{kg/s}^2/\text{m}) \quad (5)$$

mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in der untersten Wasserschicht  $\bar{U}$  und dem Reibungskoeffizienten  $C_D$ , definiert durch:

$$C_D = 0.16 \left( 1 + \ln \left( \frac{Z_0}{H_{kb}} \right) \right)^{-2}, \quad (6)$$

mit  $H_{kb}$  = Dicke der untersten Wasserschicht in m,  $Z_0 = d_{50}/12$  = Rauigkeitslänge in m und  $d_{50}$  = Korngröße (= 0.00025 m).

Die **Seegangskomponente**  $\tau_{wave}$  der Schubspannung wird definiert als:

$$\tau_{wave} = 0.5 \cdot \rho \cdot f_w \cdot U_w^2 \quad (\text{kg/s}^2/\text{m}) \quad (7)$$

mit der Orbitalgeschwindigkeit am Boden  $U_w$ , definiert durch:

$$U_w = \frac{\pi H_s}{T \sinh(kh)} \quad (\text{m/s}) \quad (8)$$

mit der signifikanten Wellenhöhe  $H_s$ , der Peak-Periode  $T$ , der Wellenzahl  $k$  und der aktuellen Wassertiefe  $h$ .

Der Reibungskoeffizient  $f_w$  wird bestimmt durch  $\max\{f_{wr}, f_{ws}\}$ , mit  $f_{wr}$  = Koeffizient bei rauhem (rough bed friction) und  $f_{ws}$  bei glattem (smooth bed friction) Untergrund:

$$f_{wr} = 0.237 \left( \frac{A}{k_s} \right)^{-0.52}, \quad f_{ws} = B \cdot R_w^{-N} \quad (9)$$

wobei der Parameter  $k_s = 2.5 d_{50}$  die Nikuradse Sandkorn Rauigkeit bedeutet.  $A = U_w T / 2\pi$  entspricht der Semi-Achsenlänge der Orbitalbewegung in m. Die Parameter des Reibungskoeffizienten bei glattem Untergrund  $f_{ws}$  unterscheiden sich bei laminarer und turbulenter Strömungsbewegung:

$$\begin{aligned} B = 2; \quad N = 0.5 & \quad \text{für } R_w \leq 5 \cdot 10^5 \quad (\text{laminar}), \\ B = 0.0521; \quad N = 0.187 & \quad \text{für } R_w > 5 \cdot 10^5 \quad (\text{turbulent}). \end{aligned}$$

Die Unterscheidung erfolgt mit Hilfe der Reynoldszahl  $R_w$ , berechnet mit:

$$R_w = \frac{U_w A}{\nu}. \quad (10)$$

Dabei ist  $\nu$  die kinematische Viskosität (= 0.0000012 m<sup>2</sup>/s).

Nachdem die Schubspannung  $\tau$  und daraus die dazugehörige Schubspannungsgeschwindigkeit  $u^*$  bestimmt wurde, wird diese mit den Grenzwerten verglichen. Je nach stattfindendem Prozess werden die Massenänderungen in den entsprechenden Boden- bzw. Wasserschichten berechnet. Findet **Erosion** statt, wird zuerst die von der Schubspannungsgeschwindigkeit abhängige Erosions-Tiefe berechnet, bis zu der SPM aus den Bodensedimentschichten herausgelöst werden kann. Ist die aktuelle Erosionstiefe größer als die des vorherigen Zeitschrittes, wird unterhalb davon neues SPM erodiert (bis zur alten Erosionstiefe ist kein SPM in der 3. Sedimentschicht vorhanden). Ist sie kleiner, werden nur die darüber liegenden Sedimentschichten 2 und 1 erodiert bzw. resuspendiert. Die **Erosions-Tiefe**, bis zu der SPM vollständig herausgelöst wird, wird berechnet mit:

$$h_{ero} = Kero \frac{u^{*2} - u_{ero}^{*2}}{u_{ero}^{*2}} \quad (\text{m}) \quad (11)$$

**K<sub>ero</sub>** ist eine wählbare Konstante der Größenordnung 0.001 m. Sie wurde im Verlauf von Testrechnungen durch Auswertung von Satellitenbildern angepasst. Im Fall der **Sedimentation** wird die aus der untersten Wasserschicht sedimentierte Masse/m<sup>2</sup>, die die Bodenschicht **z1** bildet, berechnet aus:

$$\Delta M^{SED} = C_{kb} w_{sink} \left[ 1 - \left( \frac{u^*}{u_{sed}^*} \right)^2 \right] \quad (\text{kg/m}^2 \text{ pro sek}). \quad (12)$$

**C<sub>kb</sub>** ist die SPM-Konzentration in kg/m<sup>3</sup> in der untersten Wasserschicht **kb**. Die Sinkgeschwindigkeiten der 3 Fraktionen unterscheiden sich folgendermaßen:

$$\begin{aligned} \text{Fraktion 1:} \quad w_{sink} &= 0.00010 \text{ m/s} \\ \text{Fraktion 2:} \quad w_{sink} &= 0.00002 \text{ m/s} \\ \text{Fraktion 3:} \quad w_{sink} &= 0.00100 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Im Vergleich zur Sedimentation, die den Modellzeitschritt  $\Delta t$  lang andauert, ist Erosion zeitlich unabhängig und erfolgt instantan.

### 2.3 Bodenprozesse

SPM, die sich auf dem Boden ablagert, bildet eine feine Sedimentschicht (Schicht **z1**), die von Meerestieren nach darunter liegenden Schichten verbracht wird. Aufgrund dieser Bioturbationsprozesse würden alle abgelagerten Schwebstoffe - bei Ausschließung anderer Prozesse - während der Zeit **Z<sub>A</sub>** (Größenordnung einige Tage, im Modell auf 7.23 Tage gesetzt) in die Schichten **z2** und **z3** verteilt werden.

Die Abnahme der SPM in der obersten Bodenschicht in der Zeit  $\Delta t$  (Modellzeitschritt) wird berechnet mit:

$$dM_1^B = \frac{\Delta t}{Z_A} M_1^B \quad (\text{kg/m}^2). \quad (13)$$

Diese SPM wird folgendermaßen auf die Bodenschichten **z2** (Dicke = **h<sub>leer</sub>** = **h<sub>ero</sub>** des vorherigen Zeitschrittes) und **z3** (Dicke = **z3<sub>0</sub>** (**z3** zur Zeit t=0) - **h<sub>leer</sub>**) aufgeteilt und mit den durch Diffusion (aufgrund unterschiedlicher Konzentrationen) verursachten Anteilen **dM<sup>D</sup>** korrigiert:

$$dM_2^B = dM_1^B \frac{h_{leer}}{z3_0} + dM_{3 \rightarrow 2}^D \quad (\text{kg/m}^2) \quad (14)$$

$$dM_3^B = dM_1^B \frac{z3_0 - h_{leer}}{z3_0} - dM_{3 \rightarrow 2}^D \left\{ \begin{array}{l} + dM_{4 \rightarrow 3}^D \\ - dM_{3 \rightarrow 4}^D \end{array} \right\} \quad (\text{kg/m}^2). \quad (15)$$

Die Diffusionsmengen zwischen der Bodenschicht **k** und der Nachbarschicht **k-1** werden aus der Diffusionsgleichung berechnet:

$$dM_k^D = \frac{A_{DIF} (C_k^B - C_{k-1}^B) z_k}{(0.5 (z_k + z_{k-1}))^2} \Delta t \quad (\text{kg/m}^2), \quad (16)$$

wobei **A<sub>DIF</sub>** der Diffusionskoeffizient ist (im Modell = 3.215\*10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s), und **C<sup>B</sup>** die SPM-Konzentrationen in kg/m<sup>3</sup> in den einzelnen Bodenschichten sind.

## 2.4 Vertikaler Austausch in der Wassersäule

Die Änderung der Masse in einer Wasserschicht der Dicke  $dh$  durch vertikalen Austausch über die Strecke  $dz$  wird berechnet durch:

$$dM = \frac{A_v \cdot dC \cdot dh}{(dz)^2} dt, \quad (\text{kg/m}^2) \quad (17)$$

mit  $dC$  = Konzentrationsgradient zwischen 2 benachbarten Schichten, deren Mittelpunkte um die Strecke  $dz$  auseinander liegen. Der Austausch  $A_v$  wird als Summe einer Strömungs- und Seegangskomponente betrachtet:

$$A_v = A_v^{Cur} + A_v^{Wave}. \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (18)$$

Die **Seegangskomponente**  $A_v^{Wave}$ , die von der Orbitalgeschwindigkeit in der betreffenden Tiefenschicht  $z_k$  und der Wellenperiode  $T$  abhängt, wird berechnet mittels:

$$A_v^{Wave} = Ak_{wave} \cdot U_{z_k}^{ORB^2} \cdot T \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (19)$$

Die Orbitalgeschwindigkeit des Seegangs wird in Abhängigkeit von der Tiefe bestimmt durch:

$$U_K^{ORB} = \frac{\pi \cdot H_s \cdot \cosh(k(h - z_k))}{T \cdot \sinh(kh)}, \quad (\text{m/s}) \quad (20)$$

der Seegangabhängige Austauschkoefizient wird berechnet mit:

$$Ak_{wave} = (k \cdot H_s)^2. \quad (21)$$

mit  $T$  = Wellenperiode,  $H_s$  = Wellenhöhe,  $k$  = Wellenzahl,  $h$  = gesamte Wassertiefe und  $z_k$  = Tiefe bis zur Mitte der  $k$ -ten Wasserschicht.

Die **Strömungskomponente**  $A_v^{Cur}$  wird proportional zur Stromscherung berechnet:

$$A_v^{cur} = Ak_{cur}^2 \cdot \frac{dU}{dz} = \left( \frac{U_k^2}{g} \right)^2 \cdot \frac{|U_{k-1} - U_{k+1}|}{h_k + 0.5 \cdot (h_{k-1} + h_{k+1})} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (22)$$

mit  $h_k$  =  $k$ -te Wasserschichtdicke,  $Ak_{cur}$  = Prandlscher Mischungsweg (Länge des Pfades eines Wasserteilchens bei der Diffusion von einer Schicht in die andere, nach welchem das Teilchen die kinematische Eigenschaft der anderen Schicht annimmt). Für die unterste Wasserschicht  $k = k_b$  wird die Strömungsgeschwindigkeit  $U_{k+1}$  gleich 0 gesetzt.

Im Falle eines Sturmes kann der Austausch in den obersten beiden Wasserschichten so stark sein, dass diese Schichten absolut durchmischt werden. Dies bildet die Obergrenze des maximal möglichen Austauschs.

## 2.5 Sinken des Schwebstoffs

Für alle Wasserschichten  $k$  - außer der untersten  $k_b$ , in der Sinken durch Sedimentation beschrieben wird (siehe Kapitel 2.2, Gleichung 12) - gilt für die Massenänderung aufgrund des Sinkens der Schwebstoffteilchen in der Zeit  $\Delta t$ :

$$dM_k^W = C_k^W \cdot w_{sink} \cdot \Delta t \quad (\text{kg/m}^2). \quad (23)$$

mit den Sinkgeschwindigkeiten der 3 SPM Fraktionen  $w_{sink}$ . Die neuen Konzentrationen in den Wasserschichten der Dicke  $h_k$  bestimmen sich danach zu:

$$\begin{cases} C_k^W = (C_k^W)_{alt} - \frac{dM_k^W}{h_k} \\ C_{k+1}^W = (C_{k+1}^W)_{alt} + \frac{dM_k^W}{h_{k+1}} \end{cases} \quad (\text{kg/m}^3). \quad (24)$$

Damit sind die vertikalen Verteilungsprozesse abgeschlossen. Die horizontalen Austauschprozesse erfolgen anschließend in der Subroutine **tflow**, die dahingehend erweitert wurde, dass zusätzlich zu gelösten Stoffen 3 SPM Fraktionen unabhängig voneinander transportiert werden.

## 2.6 Berechnung der horizontalen Schwebstoffverteilung

In der Subroutine **tflow** wird die durch die Strömung hervorgerufene horizontale Verteilung der 3 SPM Fraktionen in der Wassersäule berechnet (Kleine, 1993).

Für die Simulation der Advektion werden Strömungsdaten verwendet, die ebenso wie die örtlich und zeitlich variablen horizontalen Austauschkoeffizienten vorher mit dem Zirkulationsmodell des BSH (Dick et al., 2001) berechnet wurden.

Die Subroutine wird je einmal für die Konzentrations-Variablen des 6 sm Rasters und die des 1 sm Rasters aufgerufen. Hier werden auch die SPM-Konzentrationen der aktuellen Flusseinträge berücksichtigt.

## 2.7 Berechnung der Schwebstoffeinträge an Kliffs

In der Subroutine **cliff** wird an einigen, der englischen Küste vorgelagerten Gitterpunkten, die Schwebstoffkonzentration in der obersten Wasserschicht bestimmt, die durch Klifferosion verursacht wird.

Aus Langzeitbeobachtungen wurde abgeschätzt, wieviel Tonnen SPM pro Jahr an den Kliffs von Suffolk, Norfolk und Holderness erodiert werden. Die Menge pro Sekunde ist abhängig vom Seegangszustand an der Küste.

Mit Hilfe einer 3-jährigen Seegangsstatistik der Häufigkeit der verschiedenen Zustände ergab sich eine grobe Einteilung in Perioden mit signifikanten Wellenhöhen > 2 m, in denen die 10-fache Menge erodiert wird im Vergleich zu ruhigeren Perioden mit Wellenhöhen < 2 m.

Ca. 95% der Fälle betrafen derart definierte ruhige und 5% stürmische Zustände.

Damit ergaben sich folgende Werte für erodierte Mengen:

Kliff	Menge	verteilt auf x Zellen	Faktor < 2m	Faktor > 2m
Suffolk	50 kg/s	5	0.52	5.23
Norfolk	45 kg/s	3	0.61	6.13
Holderness	58 kg/s	5	0.79	7.87

Die daraus berechneten Konzentrationen werden im Verhältnis 40:20:40 auf die Schwebstoff-Fractionen 1, 2 und 3 in der obersten Wasserschicht aufgeteilt.

### 3 Sedimentverteilung am Meeresboden und fluviale Schwebstoffeinträge

Das Schwebstoff-Transport-Modell benötigt für realitätsnahe Berechnungen eine Anfangsverteilung des Schwebstoffs bzw. des Sediments am Meeresboden sowie die fluvialen Schwebstoffeinträge.

#### 3.1 Digitale Schwebstoffverteilungskarten des Meeresbodens

Die Sediment-Verteilungen wurden für die beiden Gitternetze des BSH-Modells (Gitterabstand von 1 Seemeile in der Deutschen Bucht und westlichen Ostsee, 6 Seemeilen im übrigen Gebiet) aus bei der GKSS vorliegenden mittleren Boden-Sediment-Daten erzeugt. Teilgebiete wurden mit Hilfe von einer Satellitenaufnahme der Oberflächenkonzentration, sowie mit BSH-Daten und -Karten korrigiert.

Der Schwerpunkt der Bearbeitung lag dabei auf dem Gebiet der Nordsee/Deutschen Bucht, was durch die vorhandenen Datensätze abgedeckt wurde. Für die fehlenden Gebiete der Ostsee ergab eine Datenrecherche, dass geologische Karten existieren und einige wenige kleinräumige Gebiete vermessen wurden. Dies ermöglicht eine Klassifizierung in verschiedene Bodentypen, die im wesentlichen durch die eiszeitliche Geschichte der Ostsee bestimmt ist, nicht jedoch einen direkten Rückschluss auf den darin enthaltenen Schwebstoffanteil.

Es liegen bei der GKSS mittlere Boden-Sediment-Verteilungsdaten für die Nord- und westliche Ostsee vor, die aus Messungen des ZISCH Projektes, des ICES North Sea Benthos Survey und verschiedenen Sediment-Verteilungskarten aufbereitet wurden. Für die Erstellung des digitalen Datensatzes auf einem 20 km Raster wurde nur der prozentuale Anteil der Korngrößenklassen kleiner 20 µm in den obersten 20 cm der Bodenschicht berücksichtigt (Puls et al., 1997). Aus dieser Verteilung wurden 2 weitere Datensätze für die beiden Rechengitter des Transportmodells mit den Auflösungen von 6 Seemeilen und 1 Seemeile erzeugt und im Folgenden verbessert.

Für den 03.02.2000 lag eine streifenförmige MOS-Satellitenaufnahme (Modular Optoelectronic Scanner) im Gebiet der Deutschen Bucht vor (siehe dazu auch Kapitel 4.1.1), die die SPM-Oberflächen-Konzentration 3 Tage nach einem Sturmpeak zeigt. Mit Hilfe dieser

Aufnahme und den Ergebnissen eines Transport-Modell-Rechenlaufs wurden korrigierte Versionen der oben genannten Dateien erzeugt (Pleskachevsky et. al., 2002).

Dabei wurden innerhalb des Streifens die Modellergebnisse für die oberste Wasserschicht vom 03.02.2000 (Zeitpunkt der Satellitenaufnahme) mit denen vom 31.01.2000 (Zeitpunkt des Sturmpeaks) verglichen.

Die Auswertung an Gitterpunkten, an denen während des Sturms Erosion stattfand, ergab, dass im Mittel 5% aus der Oberflächenschicht (Dicke 8 m) verschwanden.

Nach Ersetzen der berechneten Konzentrationen durch die entsprechenden Werte der Satellitenaufnahme ergaben sich zurück gerechnet mit Hilfe dieser prozentualen Unterschiede neue Werte zum Zeitpunkt des Sturmpeaks.

Unter der Annahme, dass während des Sturms der Schwebstoff in der Wassersäule gleichverteilt ist, die Oberflächenkonzentration also gleich der am Boden ist, konnte so der Schwebstoff-Inhalt im Bodensediment zu diesem Zeitpunkt rekonstruiert werden.

Bei der BSH existieren digitale Datensätze (verschiedene Korngrößenklassen) und geologische Karten für Nord- und Ostsee. Diese wurden von M. Zeiler folgendermaßen aufbereitet (pers. Mitteilung):

Für den Nordseebereich wurde die Bodenbelegung der SPM Fraktion  $< 20 \mu\text{m}$  mit Hilfe von unregelmäßig verteilten MUDAB Originaldaten erzeugt. Die mit Kriging auf ein 5000 m bzw. 1000 m Raster (Deutsche Bucht) interpolierten Daten wurden nach erfolgreicher Überprüfung an geologischen Karten den Gitterpunkten zugewiesen.

Da digitale Karten der Nachbarländer fehlten und insbesondere im Ärmelkanal wegen zu geringer Datendichte keine vernünftigen Werte entstanden, ist nicht jeder Modellgitterpunkt mit einem Wert belegt. Für den Bereich der westlichen Ostsee waren ausreichend Originaldaten vorhanden. Den verschiedenen Sediment-Typen wurden für den Gehalt der Fraktion  $< 20 \mu\text{m}$  ein Mittelwert und die Standardabweichung zugewiesen. Anschließend wurde das Modellraster mit der geologischen Karte verschnitten und ein gewichteter Mittelwert (inkl. Standardabweichung) berechnet.

Während aufgrund der Interpolation in der Nordsee "weiche" Übergänge in den Schwebstoff-Gehalten vorliegen, ist die Verteilung in der Ostsee von der Verteilung der unterschiedlichen Sediment-Typen abhängig und ergibt "scharfe" Übergänge. Im Englischen Kanal, sowie im Bereich vor der niederländischen und englischen Küste mussten die Daten noch lokal korrigiert werden.

Da im Ostseeraum östlich von Bornholm bei Abschluss des Projektes noch keine digitalen Daten zur Verfügung standen, wurde als erste grobe Näherung eine Bodenverteilung erzeugt, bei der der Anteil der Feinfraktion ein Viertel der Wassertiefe beträgt.

Die beiden folgenden Abbildungen 2 und 3 zeigen den Anteil der Feinfraktion der resultierenden SPM-Bodenbelegung im sogenannten no-Raster (6 sm) und ku-Raster (1 sm).

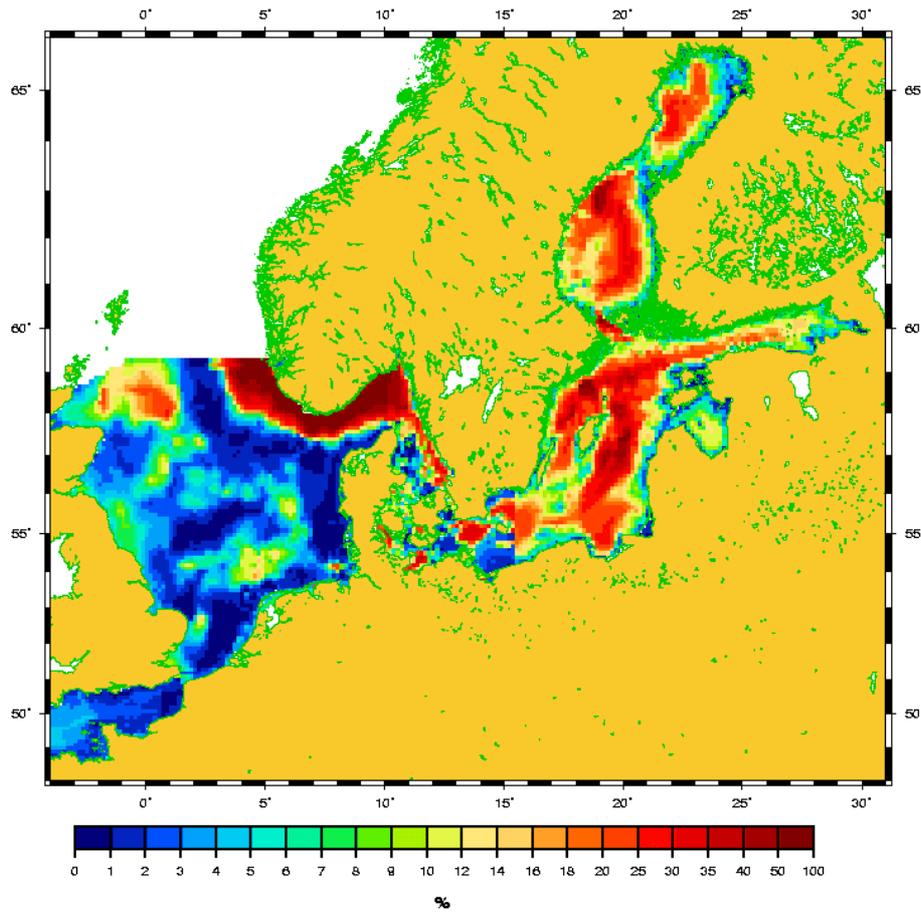


Abbildung 2: SPM-Bodenbelegung (Anteil der Feinfraktion), no-Raster (6 sm).

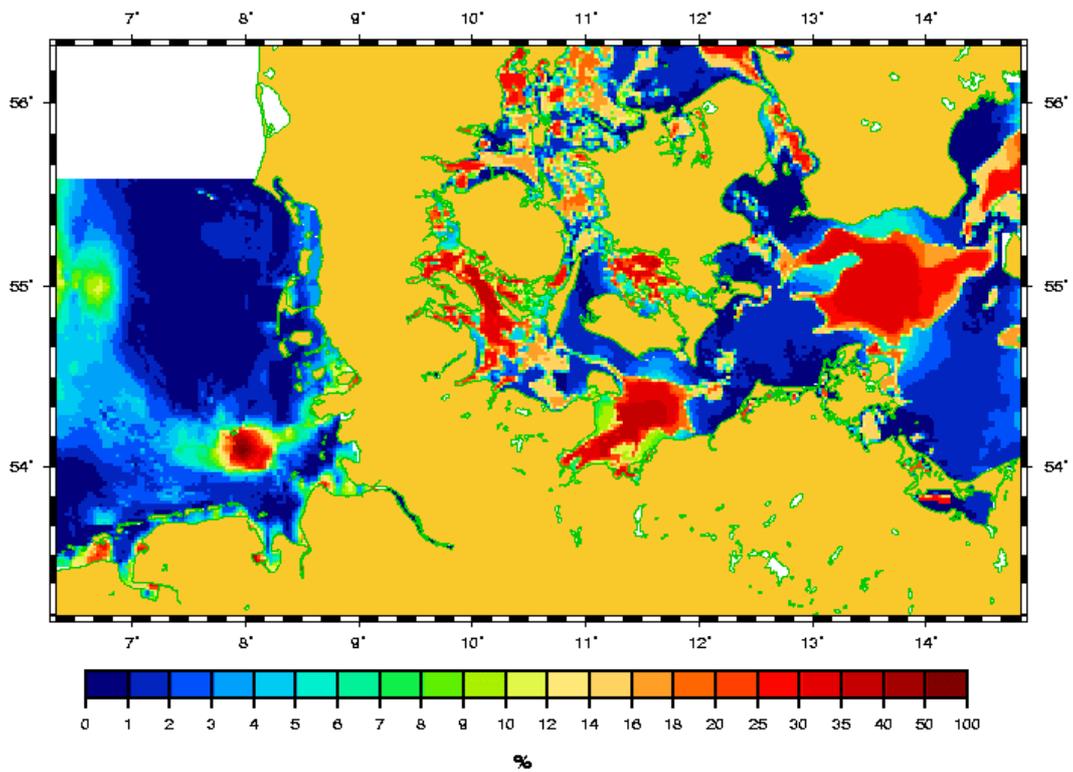


Abbildung 3: SPM-Bodenbelegung (Anteil der Feinfraktion), ku-Raster (1 sm).

### 3.2 Flusseinträge von Schwebstoffen

Im BSH Transportmodell werden an 79 Küsten-Randpunkten des 6sm-Rasters und an 5 Punkten des 1sm-Rasters Wasserdurchflussmengen als Einträge der Flüsse vorgegeben. Den mittleren Durchflüssen entsprechend wurden auch mittlere Werte für den fluvialen Schwebstoffeintrag erstellt, die in der jeweils obersten Wasserschicht eingegeben werden.

Variable Zeitreihen der Einträge für Fallstudien ergeben sich aus diesen mittleren Konzentrationswerten, entsprechend den Variationen der Durchflüsse.

Als Datenquellen standen für den Bereich der Nordsee 2 schriftliche Berichte zur Verfügung: die Delft Hydraulics Studie *Contaminant retention in North Sea estuaries* (Zwolsman, 1994), sowie der OSPAR Bericht *Data Report on the Comprehensive Study of Riverine Inputs and Direct Discharges (RID) in 2000*, veröffentlicht im Jahre 2002. Der letztgenannte Bericht enthält zwar auch Angaben, die die Schadstoffeinträge der Zuflüsse der Ostsee betreffen, leider jedoch keine zum Schwebstoff. Deswegen wurden Behörden und Institute der Ostseeanrainerstaaten kontaktiert, die freundlicherweise die Daten von einigen Flüssen zur Verfügung stellten. Dies waren im Einzelnen: - Dorota Stefek, Maritime Research Institute, Polen, - Roman Rvankevich, Rußland – Eva Edquist, SMHI/Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Schweden, - Sandra Poikane, Latvian Environment Agency, Lettland, - Gaudenta Sakalauskiene, Joint Research Centre, Litauen, - Thomas Leipe, IOW, Deutschland, - Antti Räike, Finnish Environment Institute, Finnland.

Insgesamt konnten die SPM Einträge von 51 der 79 Flüsse bestimmt werden. Die Angaben zu den restlichen wurden den Wasserdurchflussmengen entsprechend geschätzt.

Die Nordsee-SPM-Flussdaten aus den beiden zuvor genannten Berichten enthielten meist getrennte Angaben für die Frachten in Tonnen/Jahr und die Wasserdurchflussmengen in m<sup>3</sup>/s. Fehlte die Durchflussmenge, wurde der entsprechende mittlere Wert aus der BSH Eingabedatei genommen. Aus den Angaben für Fracht und Durchflussmenge wurden Schwebstoffkonzentrationen in Tonnen/km<sup>3</sup> bzw. mg/l gebildet, die in folgenden Tabellen wiedergegeben sind.

In einigen Fällen gab es Angaben für verschiedene Zonen im Flussmündungsbereich wie "obere, von der Tide nicht mehr beeinflusste Zone", "Mischzone" sowie "Sammelbecken vor der Mündung". Hier wurden die Daten des tideunbeeinflussten Flusses berücksichtigt. Im Falle der SMHI-Daten wurden die der Flussmündung nächstgelegenen Messstation benutzt. Deren Lage kann dem SMHI-Hydrologi Report *Sedimenttransport i svenska vattendrag* (Brandt, 1996) entnommen werden.

Fluss	Alle Jahre		Angaben von	Messzeit- raum
	normal	hoch		
Neva	8.0	30.0	Rußland state env. report 2000	
Neva	6.2		Finnland	2000 – 2001
Daugava	5.6		Letland	1997 – 2001
Neva	16.0		IOW geschätzt	
Weichsel	16.9		IOW HELCOM PLC-3	
Daugava	3.5		IOW HELCOM PLC-3	
Neman	13.1		IOW HELCOM PLC-3	
Oder	17.4		IOW HELCOM PLC-3	
Kemijoki	8.0		IOW geschätzt	
Göta älv	8.0		IOW geschätzt	
Angermanälv	8.0		IOW geschätzt	
Luleälven	8.0		IOW geschätzt	
Indalsälven	8.0		IOW geschätzt	
Memel	18.8		Litauen	1995 – 2001
Firth of Forth	48.0		Report	
Tyne	10.0		Report	
Tees	15.0		Report	
Humber	55.0		Report	
The Wash	60.0		Report	
Thames	19.0		Report	
Scheldt	100.0		Report	
Rhein, Meuse	30.0		Report	
Ijsselmeer, Wadden- sea	24.0		Report	
Ems, Dollart	20.0		Report	
Weser	35.0		Report	
Elbe	38.0		Report	
Eider	10.0		Report	

Tabelle 1: SPM-Konzentrationen von Ostsee- und Nordsee-Zuflüssen in mg/l.

Fluss	Alle Jahre			Letztes Jahr			Messzeitraum
	Mittel	Min	Max	Mittel	Min	Max	
Kalixaelven *	4.95	0.5	69.0	4.08	1.3	12.4	1979 – 1994
Kalixaelven	8.1	1.4	52.3	9.59	3.7	33.8	1967 – 1978
Luleaelven	5.48	0.1	80.8	5.47	0.1	37.6	1976 – 1981
Piteaelven	19.59	0.2	774.6	5.99	0.7	64.7	1967 – 1994
Loegdaaelven	20.87	0.4	858.0	27.61	1.8	187.0	1969 – 1983
Aangermanaelven *	10.64	0.9	225.2	26.85	3.7	107.2	1967 – 1981
Ljungan	5.18	0.3	54.5	4.19	0.7	12.4	1976 – 1982
Dalaelven	5.44	0.7	226.0	5.64	1.4	14.9	1976 – 1994
Stormyrabaacken	17.08	3.4	132.5	15.05	3.5	50.0	1980 – 1994
Emaan	6.55	0.2	45.6	4.48	1.4	9.3	1967 – 1994
Moerrumsaan	4.84	0.4	82.0	5.12	2.7	8.5	1976 – 1994
Roenne aa *	11.45	1.1	205.8	10.06	5.3	17.7	1967 – 1994
Viskan	14.65	1.4	1388.5	12.57	3.6	62.6	1967 – 1994
Goeta aelv	18.59	0.7	788.1	8.2	1.3	32.1	1967 – 1980
Nordre / Goeta aelv	10.32	0.2	677.0	6.14	2.4	26.3	1967 – 1981

Tabelle 2: SPM-Konzentrationen schwedischer Flüsse in mg/l (\* = oberer Flusslauf).

Fluss	Alle Jahre		Messzeitraum
	normal	hoch	
Iijoki	2.3	6.7	1997 – 2001
Kalajoki	9.0	37.6	1997 – 2001
Kemijoki	1.3	6.0	1997 – 2001
Kiiminkijoki	3.4	7.6	1997 – 2001
Kokemäenjoki	8.8	18.8	1997 – 2001
Kymijoki	4.1	7.1	1997 – 2001
Kyrönjoki	10.8	52.1	1997 – 2001
Lapuanjoki	8.1	34.5	1997 – 2001
Oulujoki	3.5	3.8	1997 – 2001
Pyhäjoki	5.8	23.4	1997 – 2001
Siikajoki	7.1	27.7	1997 – 2001
Simojoki	1.9	5.2	1997 – 2001
Tornionjoki	2.7	7.4	1997 – 2001

Tabelle 3: SPM-Konzentrationen finnischer Flüsse in mg/l.

## **4 Szenarienrechnungen und Fallstudien**

Das Transportmodell wurde durch unterschiedliche Szenarienrechnungen und Fallstudien ausgiebig getestet und validiert. Durch den Vergleich mit Messdaten (Satellitenaufnahmen und Zeitreihen) wurden sowohl die flächenhafte Darstellung als auch die vertikale Verteilung der berechneten Schwebstoffverteilungen überprüft. Die Szenarienrechnungen decken teilweise Zeiträume von mehreren Wochen bis Monaten ab. Zu den Fallstudien gehören:

- qualitative Untersuchung zur Lage und Ausbreitung von Schwebstoffwolken während eines Sturms im Januar/Februar 2000 sowie im Winter 2000/2001
- Simulation von kleinräumigen Prozessen
- Simulation von Schwebstoffeinträgen durch die Elbe
- fiktive Ausbreitungssimulationen für Baggergut
- Simulation von fiktiven Unfallszenarien für an Schwebstoff gebundene Schadstoffe

### **4.1 Großräumige Ausbreitungssimulationen**

Bei den folgenden beiden Simulationen in der südlichen Nordsee wird das Modellverhalten dahingehend getestet, ob die Randwert-Übergabe zwischen grobem und feinem Raster funktioniert, die aus Satellitenaufnahmen bekannten typischen Verteilungsmuster des Schwebstoffs während stürmischer Wetterlagen entstehen (Kapitel 4.1.1) und der längerfristige SPM Transport von der Englischen Küste bis in die Deutsche Bucht simuliert werden kann (Kapitel 4.1.2).

#### **4.1.1 Berechnung von Schwebstoffkonzentrationen im Januar/Februar 2000**

Für eine erste Überprüfung des Modells wurde der Simulationszeitraum 03.01.2000 bis 06.02.2000 ausgewählt. Im betrachteten Zeitraum wechselten ruhige Wetterlagen mit stürmischen Verhältnissen ab. Vor allem Ende Januar traten einige sehr schwere Stürme in der südlichen Nordsee auf. Während des west-nordwestlichen Sturms am 30.01.2000 wurden beispielsweise an der Station NSB II in der Deutschen Bucht signifikante Wellenhöhen über 8,5 m gemessen. Der Simulationszeitraum war deshalb besonders geeignet, um sowohl den Strömungs- als auch den Seegangseinfluss auf die Schwebstoffdynamik zu untersuchen.

Ein weiterer Grund für die Auswahl des Simulationszeitraums Januar/Februar 2000 war, dass für den 03.02.2000 eine Satellitenaufnahme (MOS-Daten) der Schwebstoffverteilung in der Deutschen Bucht verfügbar war. Die vom Satelliten gemessene Oberflächenverteilung konnte für eine Validation des Modells herangezogen werden.

Mitte Januar traten bei geringen Windgeschwindigkeiten (3 – 4 Bft.) lediglich im Küstenbereich höhere Schwebstoffkonzentrationen auf. Die Karte der Oberflächen-Verteilung (Summe aller 3 Fraktionen) vom 23.01.2000 zeigt vor der englische Ostküste, der Scheldemündung und in der südlichen Deutschen Bucht maximale Schwebstoffkonzentrationen von 20 – 30 mg/l.

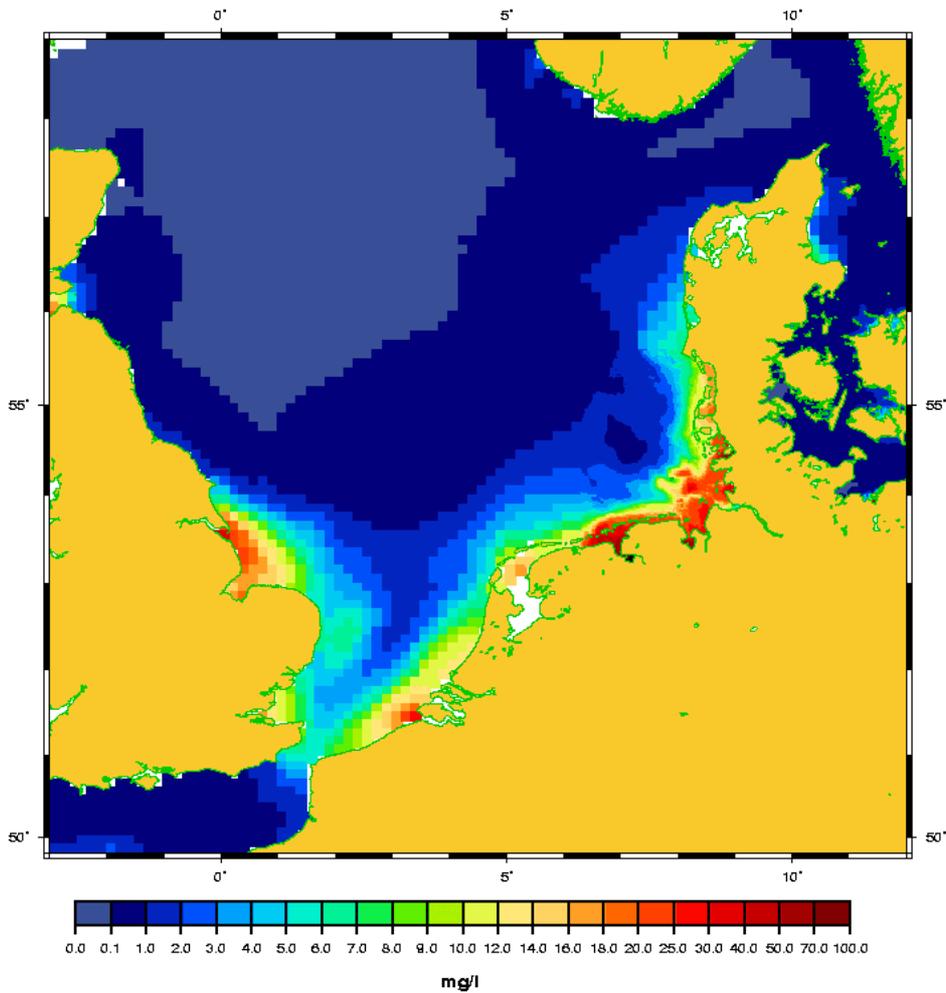


Abbildung 4: berechnete Oberflächen-SPM-Verteilung in mg/l, 23.01.2000, 12 Uhr.

Etwa ein Tag nach dem schweren Sturm am 30.01.2000 zeigt Abbildung 5 in der südlichen Nordsee eine S-förmige Schwebstoffverteilung (rote Farb-Pixel) mit maximalen Konzentrationen von etwa 30 mg/l. Im Mündungsbereich der Elbe, südlich von Helgoland, sowie im Ostfriesischen Wattenmeer wird sehr viel Schwebstoff erodiert. Dort treten Konzentrationen von über 60 mg/l auf.

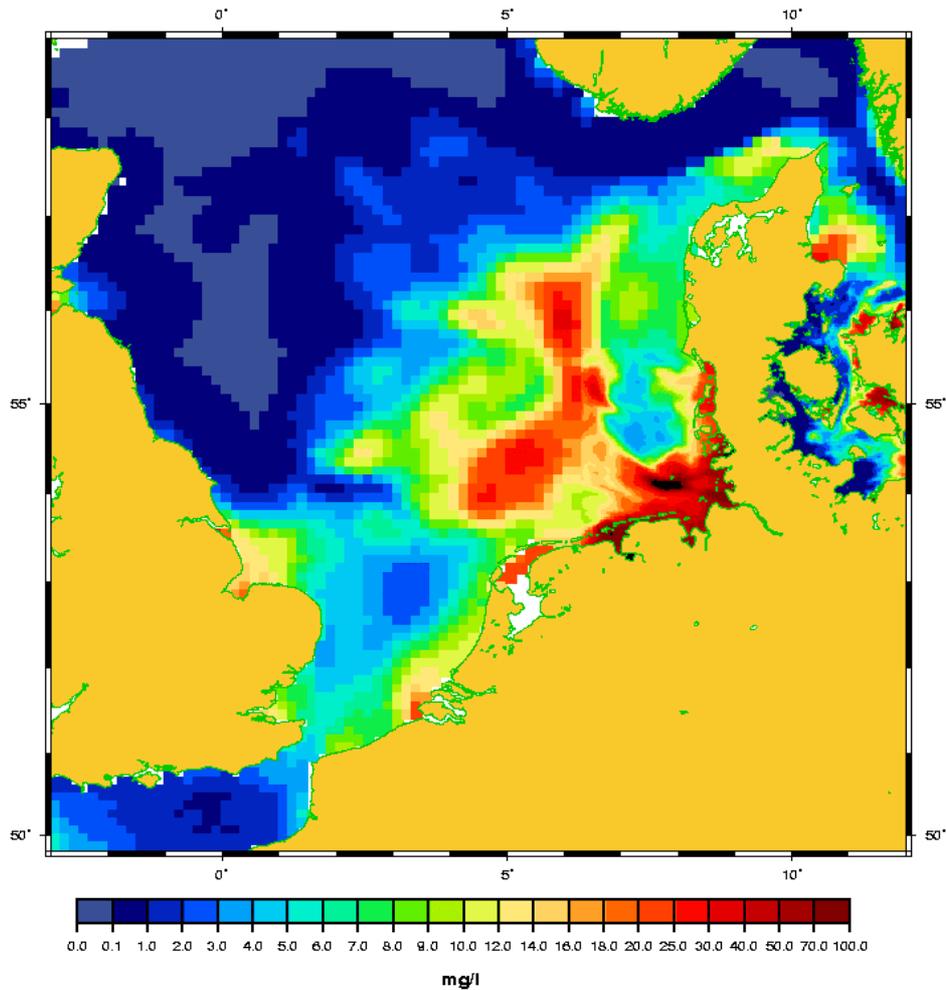


Abbildung 5: berechnete Oberflächen-SPM-Verteilung in mg/l, 31.01.2000, 12 Uhr.

Am 03.02.2000 führte ein weiterer Sturm zu einem erneuten Aufwirbeln von Schwebstoffen. Zudem wird suspendiertes Material mit den Strömungen verlagert. Die Schwebstoff-Fahne bei Helgoland erstreckt sich beispielsweise am 03.02.2000 in nordwestliche Richtung bis in die äußere Deutsche Bucht. Westlich von Jütland werden Schwebstoffe in den südlichen Bereich des Skagerrak transportiert (siehe Abbildung 6).

Ähnliche Strukturen sind auch auf einer Aufnahme des MOS Satelliten (Modular Opto-electronic Scanner) vom 03.02.2000 zu erkennen, die freundlicherweise von A. Neumann und H. Krawczyk von der DLR zur Verfügung gestellt wurde (siehe Abbildung 7).

Auch wenn im Detail Abweichungen zwischen der Satellitenaufnahme und den Modellergebnissen zu erkennen sind (z.B. vor der dänischen Küste), stimmen die Darstellungen in wesentlichen Punkten überein. Modell und Messung zeigen beide die S-förmige Struktur mit erhöhten Konzentrationen in der äußeren Deutschen Bucht, außerdem erhöhte Konzentrationen in Küstennähe und westlich von Sylt ein Gebiet mit geringen Konzentrationen.

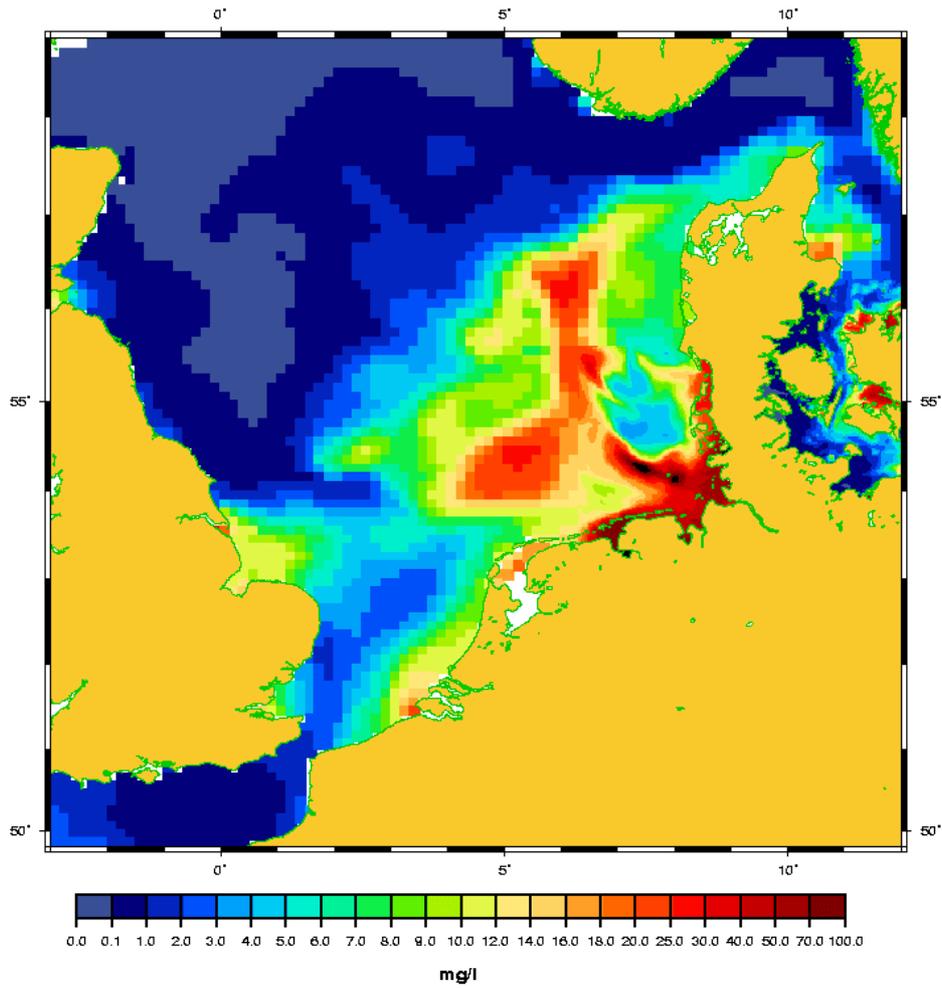


Abbildung 6: berechnete Oberflächen-SPM-Verteilung in mg/l, 03.02.2000, 12 Uhr.

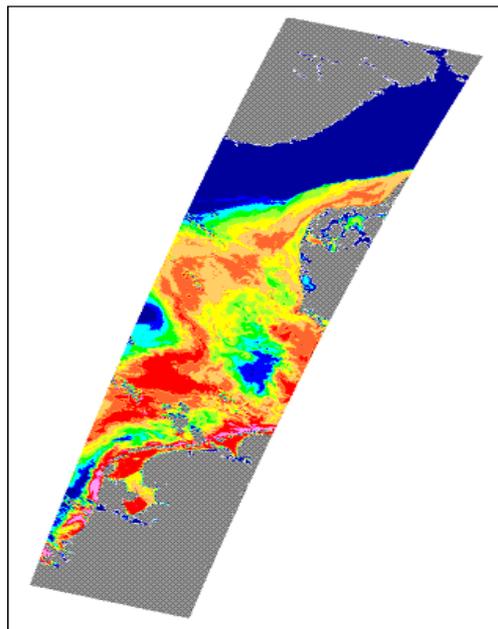


Abbildung 7: gemessene Oberflächen-Verteilung am 03.2.2000 (MOS-Satellitendaten)

#### 4.1.2 Berechnung von Schwebstoffkonzentrationen im Winter 2000/2001

Der Simulationszeitraum beträgt etwa 3 Monate von Anfang Dezember 2000 bis März 2001. Während des gesamten Zeitraums sind hohe Konzentrationen in den Küstengewässern der Deutschen Bucht zu beobachten.

In den Becken vor den großen Flussmündungen an der Englischen Küste sammeln sich größere Mengen Schwebstoff, zum einen aus den flachen Gebieten vor der Küste und durch die Tide heran getragen, zum anderen fluvialen Ursprungs (siehe Abbildung 8).

Periodisch lösen sich Schwebstoffwolken, die anschließend „etappenweise“ zur holländischen Küste und längerfristig mit dem Küstenstrom auch bis in die Deutsche Bucht gelangen (Abbildung 9 und 10).

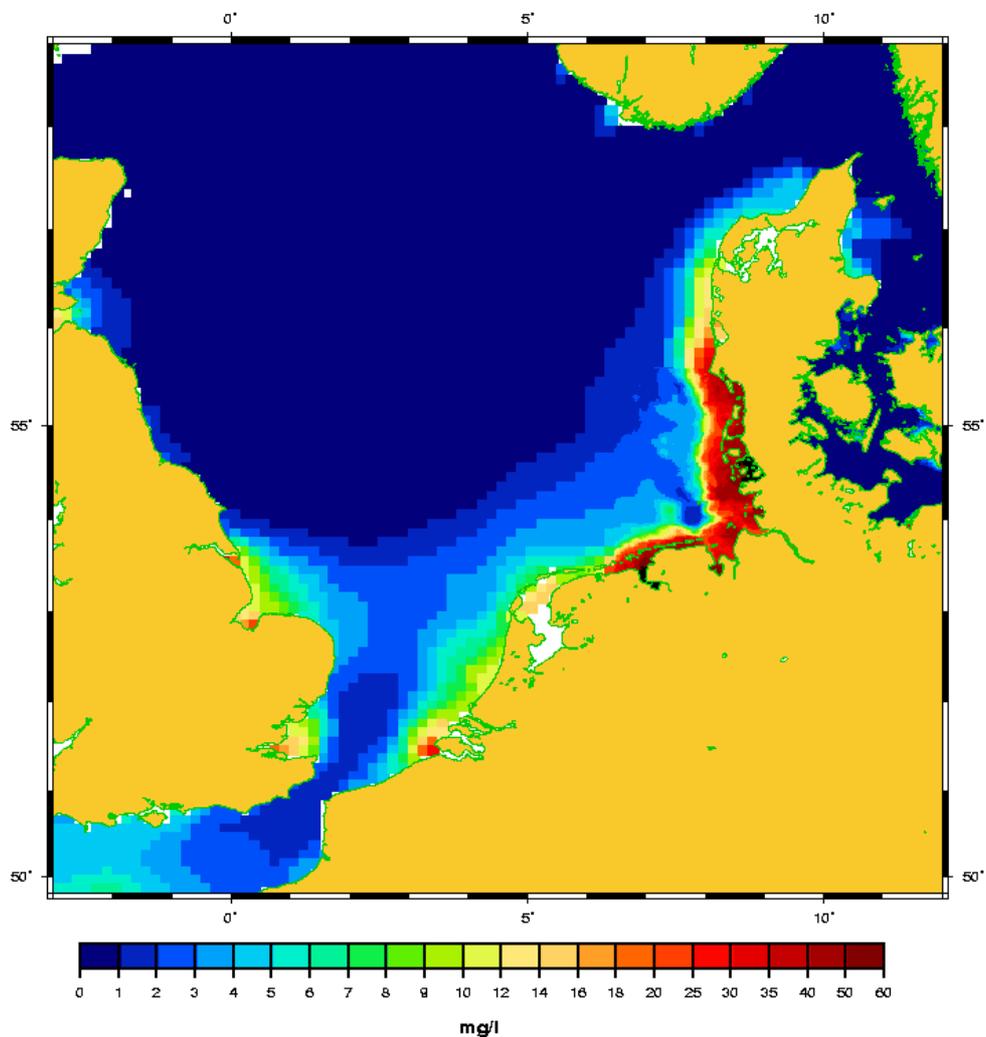


Abbildung 8: Oberflächen-SPM-Verteilung in mg/l, 15.02.2001, 00:00 Uhr.

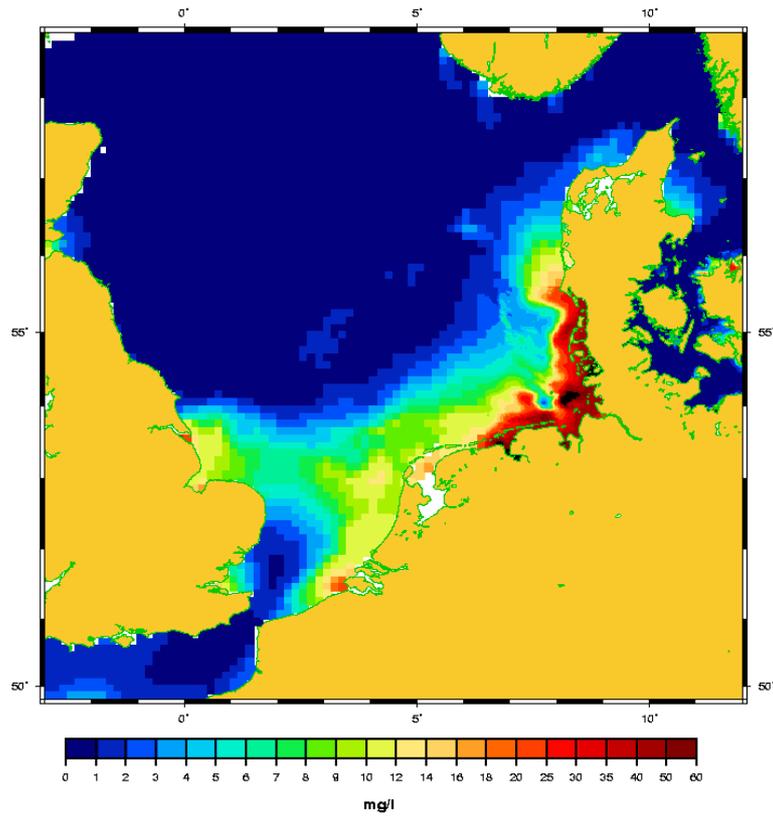


Abbildung 9: Oberflächen-SPM-Verteilung in mg/l, 22.02.2001, 00:00 Uhr.

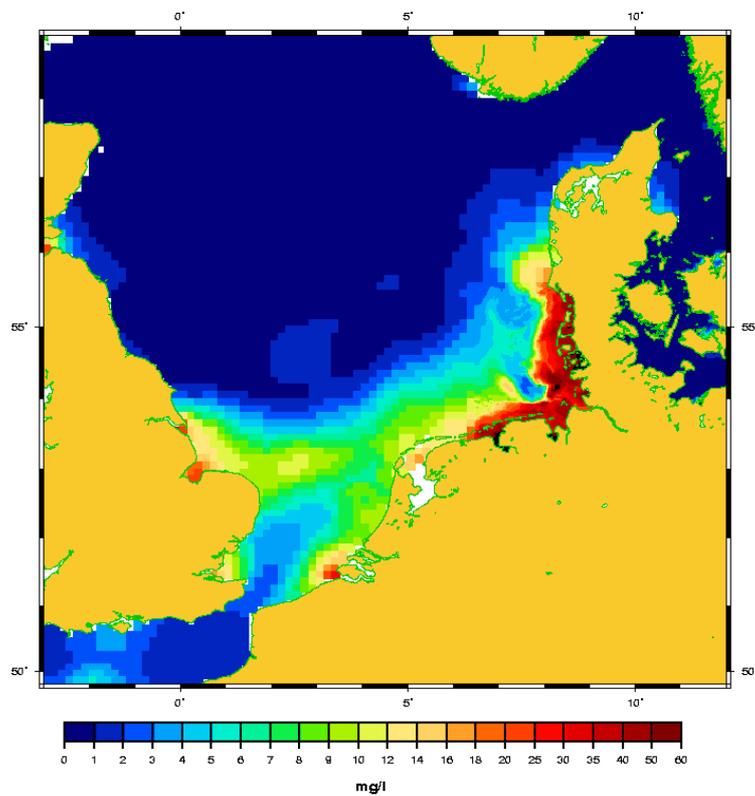


Abbildung 10: Oberflächen-SPM-Verteilung in mg/l, 01.03.2001, 00:00 Uhr.

Für eine Validation des SPM-Transportmodells wurden Ergebnisse aus der Deutschen Bucht mit BSH-Messungen verglichen, die vom 04.12.2000 bis zum 02.03.2001 bei 54° 09' N, 07° 50'E an der Station B südlich von Helgoland durchgeführt wurden (König, pers. Mitteilung). Wie schon im Vorjahr waren an der Station B zwei Trübungsmessgeräte verankert. Leider fiel das Gerät in 10 m Tiefe aus, so dass nur Daten in Bodennähe für den Vergleich mit Modell-Ergebnissen herangezogen werden konnten.

Abbildung 11 zeigt einen Vergleich der mit Hilfe von Wasserproben kalibrierten Trübungsmessungen in Bodennähe (51 m Tiefe) mit Modellergebnissen für die Bodenschicht. Generell stimmen die Modellergebnisse gut mit den Messwerten überein. Während die maximalen Konzentrationen bei stürmischen Wetterlagen sehr gut wiedergegeben werden, werden die Konzentrationen bei ruhigen Wetterverhältnissen (20.01.2001 bis 19.02.2001) geringfügig überschätzt. Auch das Modell gibt die in den Messungen zu erkennenden Gezeitenfluktuationen wieder, wobei die Konzentrationsschwankungen im Modell bei Sturmereignissen etwas unterschätzt werden. Die größten Abweichungen treten zu Beginn der Zeitreihe auf.

Näher untersucht werden muss noch, ob der 'Phasenfehler' des Modells, d.h. der verzögerte Anstieg und Abfall der Konzentrationen, an der Umsetzung der Schwebstoffprozesse im Modell oder an fehlerhaften Anfangsbedingungen für die Konzentration im Wasser und in der Bodenschicht liegt.

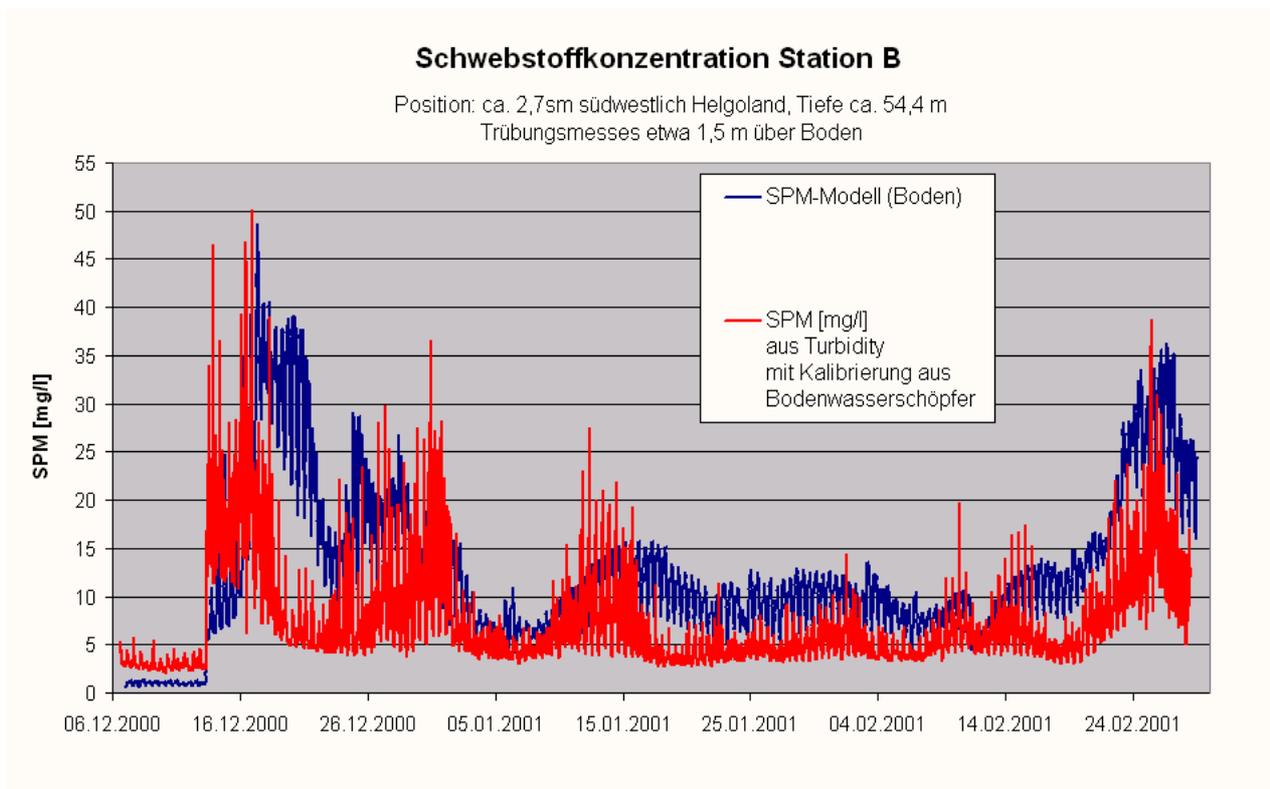


Abbildung 11: Vergleich gemessener und berechneter Schwebstoffkonzentration in Bodennähe an der Station B in der Deutschen Bucht.

## 4.2 Simulation kleinräumiger Prozesse (horizontale Advektion und vertikale Dispersion)

Zur Darstellung der kleinräumigen Prozesse wurde der Simulationszeitraum vom 29.01.2000 bis 06.02.2000 ausgewählt. Die folgenden Abbildungen zeigen die Rechenergebnisse an dem Gitterpunkt 135,62 des feinen Rasters südlich von Helgoland bei einer mittleren Wassertiefe von ca. 51.6 m. Am Anfang des 30.01.2000 findet ein heftiger Sturm statt (siehe auch Abbildung 14: Schubspannungsgeschwindigkeiten).

In Abbildung 12 sind die Konzentrationsänderungen (Summe aller 3 SPM Fraktionen) durch die strömungsbedingte horizontale Advektion in den 4 Wasserschichten (von oben nach unten mit den Schichtdicken 8 m (+Auslenkung), 8 m, 8 m und 26.6 m) in mg/l dargestellt.

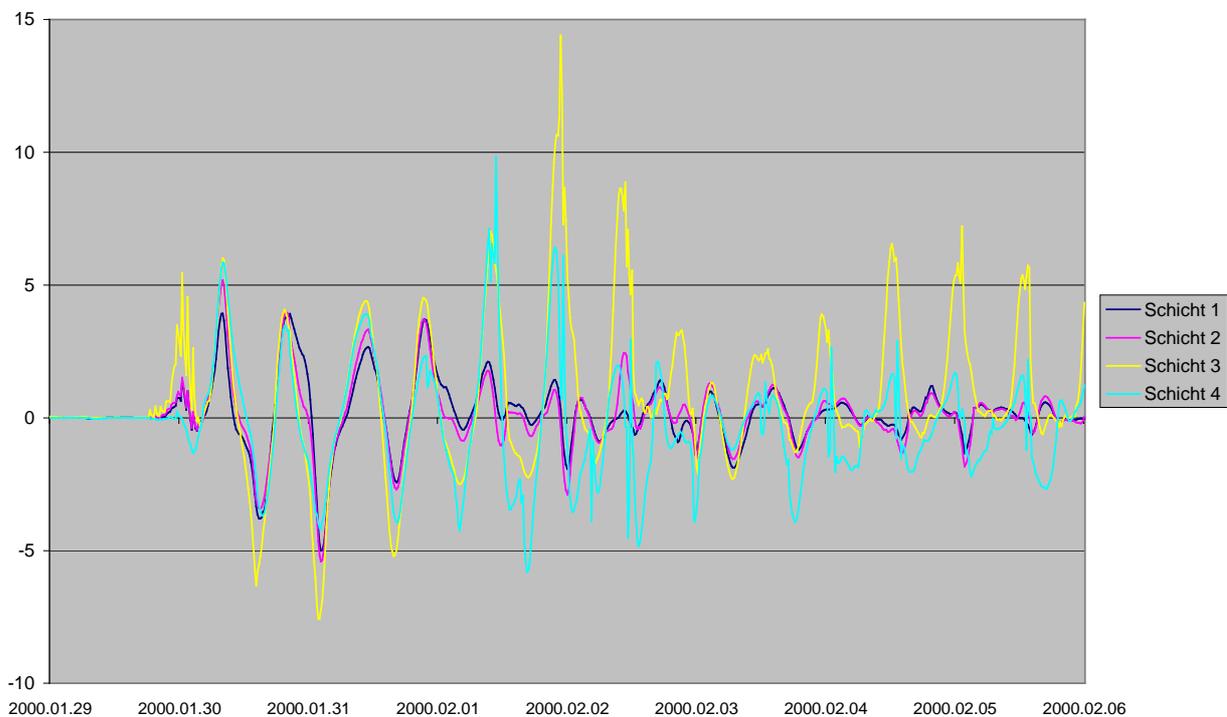


Abbildung 12: Konzentrationsänderungen durch horizontale Advektion in mg/l.

Die Konzentrationsänderungen der Schicht 1 und 2 verhalten sich über den gesamten Zeitraum sehr ähnlich, da die beiden Schichten gut durchmischt sind und die Strömungsverhältnisse sich entsprechen (hier nicht gezeigt). Der größte Austausch findet am 01.02.2000 in Schicht 3 statt, in der die Konzentration um bis zu 14.4 mg/l ansteigt.

Bis zu diesem Zeitpunkt halten sich der Verlust und Gewinn, wie auch in den anderen Schichten, in etwa die Waage, danach überwiegt der Gewinn an SPM in Schicht 3, im Gegensatz zu Schicht 4, in der mehr SPM verloren geht als herangebracht wird.

Insgesamt, über den gesamten Zeitraum betrachten, ergeben sich folgende Beträge der Konzentrationsänderungen (in mg/l) durch horizontale Advektion: Schicht 1: 122.6, Schicht 2: 108.7, Schicht 3: 658.1, Schicht 4: -184.3.

Bezüglich des gesamten (alle in dem Programmteil SPM behandelten Prozesse) vertikalen Austauschs in den einzelnen 4 Wasserschichten ergibt sich folgendes Bild, das geprägt ist von kontinuierlichen Zeitreihen in den Schichten 1-3 und Peaks in der Schicht 4, was zurückzuführen ist auf kurzzeitig auftretende Bodenerosion bzw. Resuspension von Material, das zuvor sedimentierte:

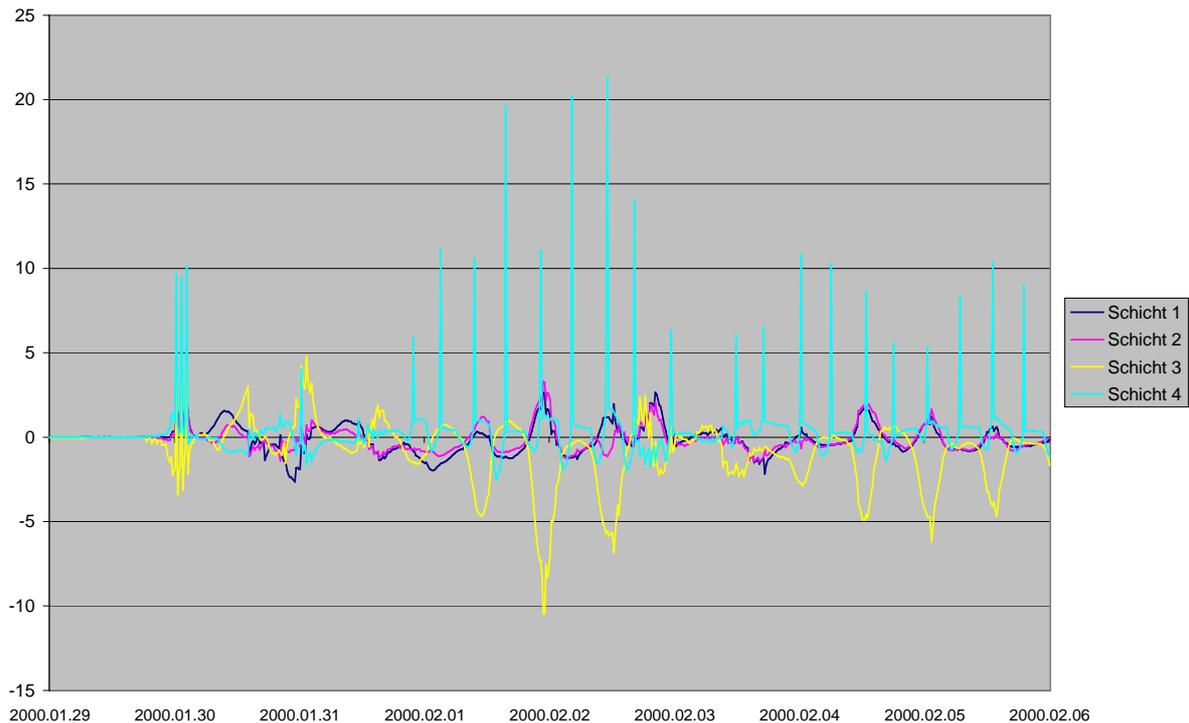


Abbildung 13: Konzentrationsänderungen durch vertikale Austauschprozesse in mg/l.

Wie zuvor bei der horizontalen Advektion verhält sich das SPM (Summe aller 3 Fraktionen) in den Schichten 1 und 2 aufgrund der guten Durchmischung sehr ähnlich.

Der größte Austausch findet wiederum in Schicht 3 statt, die meist an die umliegenden Schichten verliert. In der Summe über die gesamte Zeitreihe sind dies: ein Verlust in der SPM-Konzentration von 100.1 mg/l in Schicht 1, ein Verlust von 85.3 mg/l in Schicht 2, ein Verlust von 622.0 mg/l in Schicht 3 und ein Gewinn von 270.7 mg/l in Schicht 4.

Dieses Gesamtbild lässt sich auf einzelne Prozesse aufteilen. Wie man in der folgenden Abbildung 14 sieht, sind die Schubspannungsgeschwindigkeiten nur am Anfang der Zeitreihe während des Sturms groß genug, dass Erosion stattfinden kann ( $> 28$  mm/s).

Sehr oft hingegen findet Resuspension statt ( $> 10$  mm/s). Während des Sturms ist die Summe der Schubspannungsgeschwindigkeit (zur Definition der Summe der Schubspannung siehe Seite 8) im Wesentlichen bestimmt durch den Wellenanteil, später folgt die Summenkurve meist der des Strömungsanteils und der Wellenanteil ist vernachlässigbar.

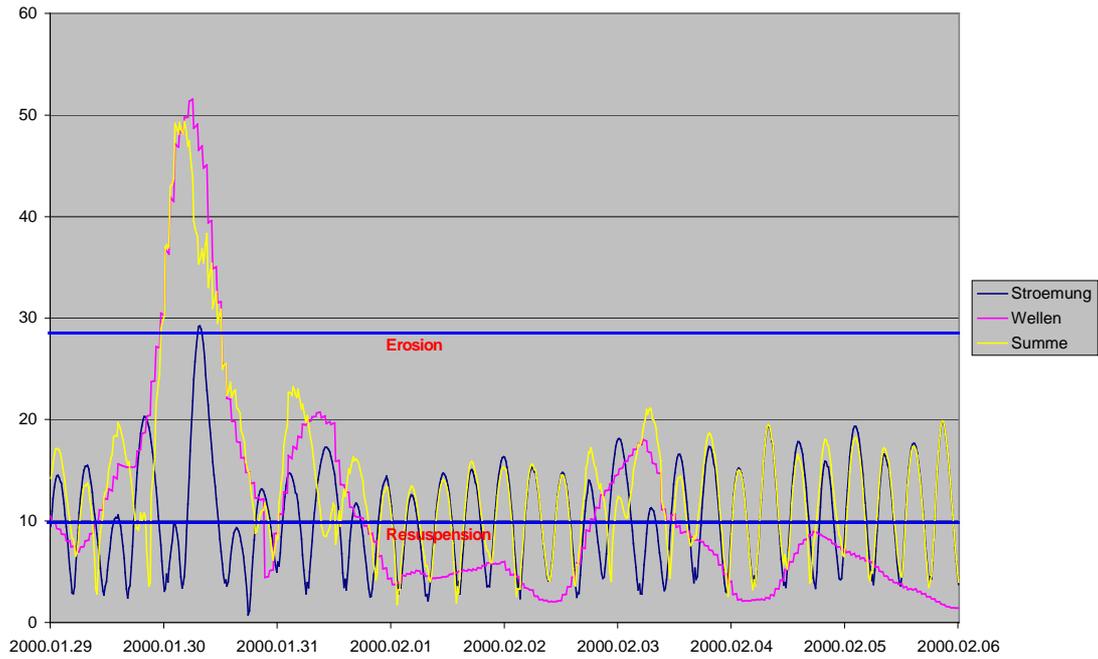


Abbildung 14: Schubspannungsgeschwindigkeiten und Grenzwerte in mm/s.

Diesem Bild entsprechend zeigen sich die Konzentrationsänderungen durch Erosion (bzw. Resuspension) in der untersten Wasserschicht. Abbildung 15 zeigt beispielhaft Fraktion 3, da hier die größten Änderungen zu beobachten sind.

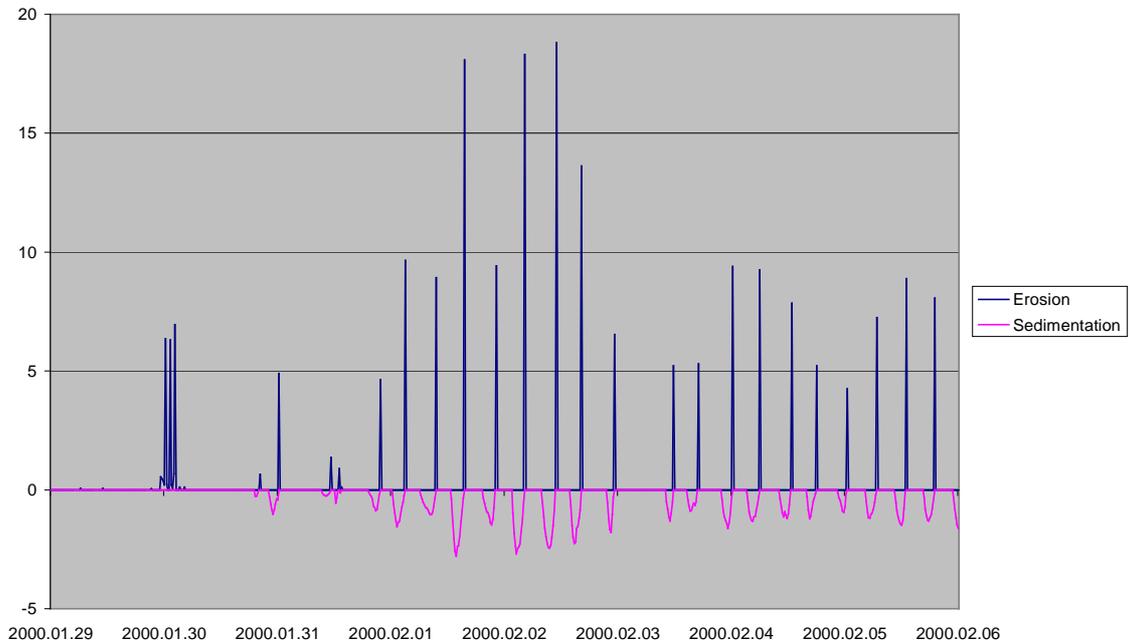


Abbildung 15: Konzentrationsänderungen durch Erosion und Sedimentation in mg/l.

In der Erosionsphase während des Sturms steigt die Konzentration um bis zu 7 mg/l in der untersten Wasserschicht an. Später sedimentiert Material über kurze Zeiträume und bildet jeweils eine dünne Bodenschicht, die schlagartig, bei Überschreitung des Schubspannungsgeschwindigkeits-Grenzwertes für Resuspension, wieder aufgelöst wird. Dadurch entstehen für Fraktion 3 Konzentrationsänderungen von bis zu 18 mg/l. In der Summe über die gesamte Zeitreihe steigt die SPM-Konzentration um 15.9 mg/l (+209.6 durch Erosion und Resuspension, -193.7 durch Sedimentation) an.

Zum Vergleich: Fraktion 1: maximale Änderung während des Sturms 5.5 mg/l durch Boden-erosion, später bis zu 1.1 mg/l durch Resuspension, Summe = 17.7 mg/l (+30.3, -12.6), Fraktion 2: maximal 0.6 mg/l, später bis zu 0.03 mg/l, Summe = 2.0 mg/l (+2.3, -0,3).

Nachdem diese Austauschprozesse mit dem Boden abgeschlossen sind, verteilt sich das SPM weiter in der Wassersäule durch Diffusions-Prozesse und Sinken der Teilchen (Abbildung 16). Dem Gesamtbild entsprechend (siehe Abbildung 13) sind die größten Konzentrationsänderungen in der Schicht 3 zu beobachten, die nach dem Sturm 1.5 Tage lang einen Gewinn an SPM verzeichnet, später überwiegt der Verlust.

In der Summe über die gesamte Zeitreihe sind dies: eine Änderung von -100.1 mg/l in Schicht 1 (-1523.4 mg/l durch Sinken, +1423.7 mg/l durch Diffusion), - 85.3 mg/l (-166.6, +81.3) in Schicht 2, -622.0 mg/l (-367.3, -254.7) in Schicht 3 und von +235.1 mg/l (+635.6, -400.5) in Schicht 4. Diese Bilanzen entsprechen in den Schichten 1-3 denen der gesamten Bilanz. In Schicht 4 ergibt sich die Gesamtbilanz von 270.7 mg/l durch Addition der 235.1 mg/l und der durch Erosion und Resuspension hervorgerufenen 35.6 mg/l.

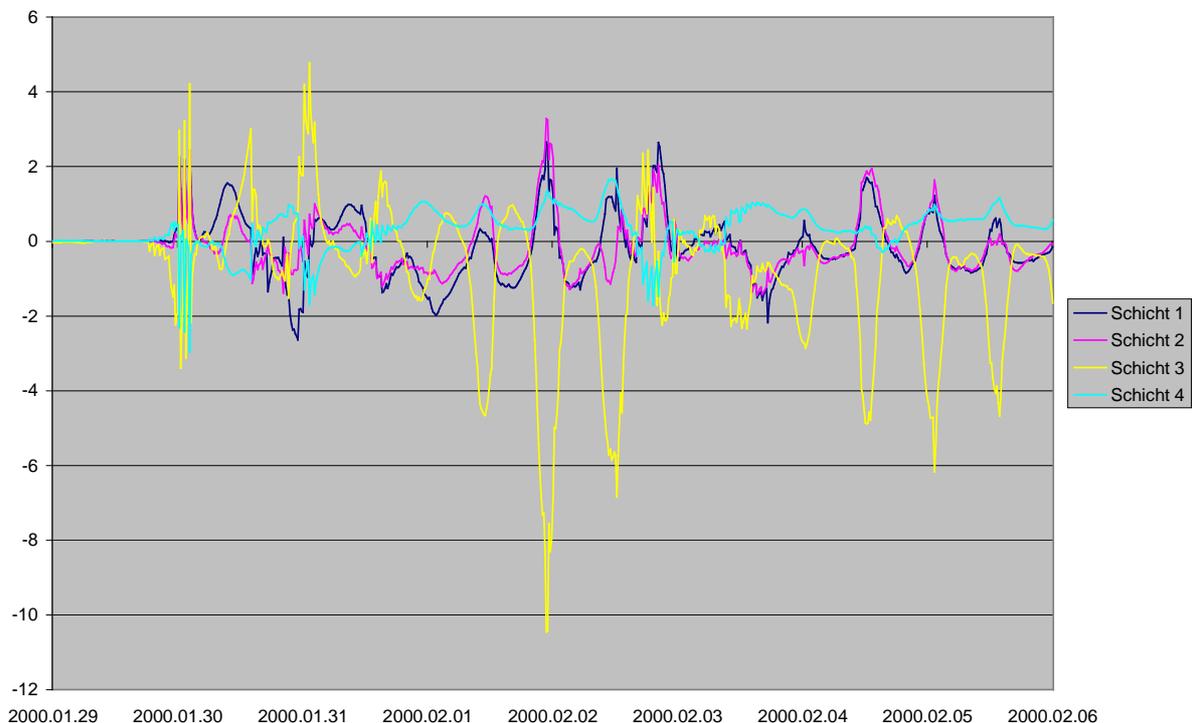


Abbildung 16: Konzentrationsänderungen durch Sinken und Diffusion in mg/l.

### 4.3 Simulation eines Schwebstoffeintrags durch die Elbe

In diesem Szenario wird über einen 4-monatigen Zeitraum die Ausbreitung von Schwebstoffen untersucht, die über die Elbe in die Nordsee eingetragen werden. Dieses Szenario beschreibt zudem eine mögliche Ausbreitung von partikulären oder an Schwebstoffe gebundenen Schadstoffen aus der Elbe.

Bei der Simulation wurden vorhandene Verteilungen von Schwebstoffen im Boden oder Wasser nicht berücksichtigt, sondern lediglich eine hypothetische Einbringung durch die Elbe untersucht. Mit der Simulation sollten Transportzeiten von Schwebstoffen und die Ausbreitung von Schwebstoffen in der Nordsee abgeschätzt werden, die mit dem Elbehochwasser im Sommer 2002 in die Nordsee eingetragen wurden.

Die Einleitung der SPM mit einer konstanten Konzentration von 100 mg/l (jedoch variables Oberwasser) erfolgt an dem Gitterpunkt (177,154), der dem Wehr Geesthacht entspricht und beginnt am 20.08.2002, einige Tage vor dem Erreichen des maximalen Elbehochwasserstandes bei Geesthacht.

9 Tage später, am 29.08.2002 00:00 Uhr, erreicht der fluviale Schwebstoff die Elbmündung (siehe Abbildung 17).

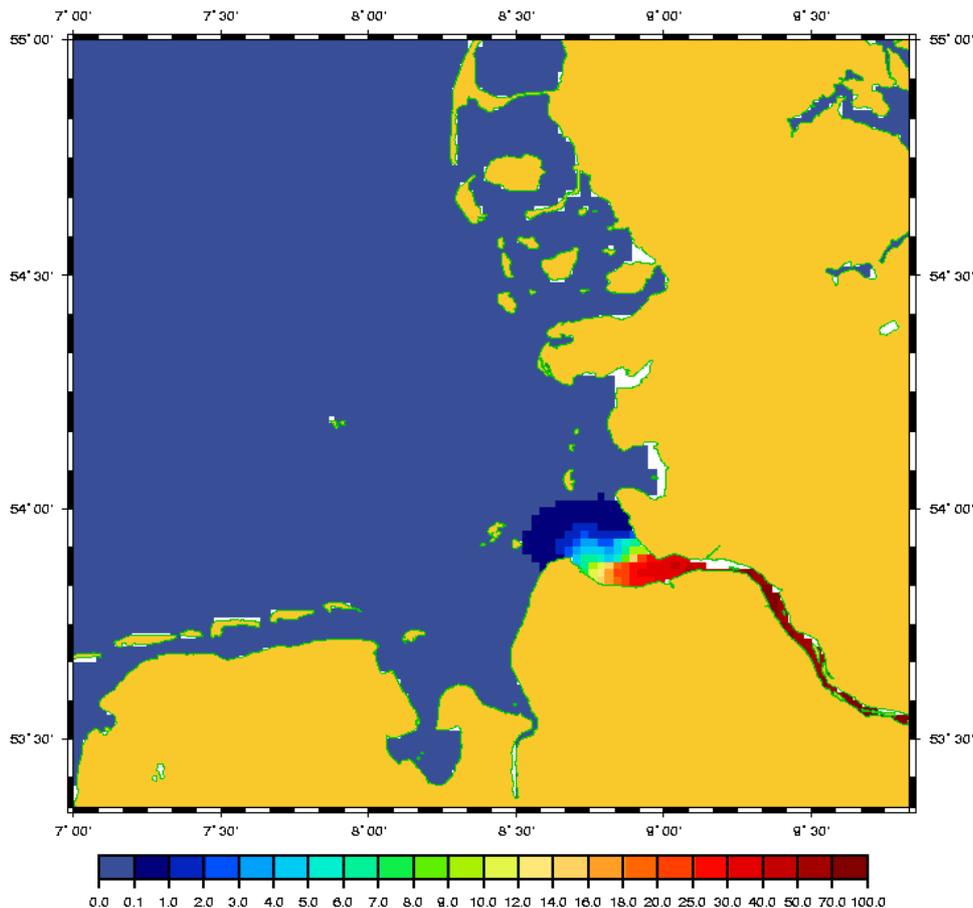


Abbildung 17: Oberflächen-SPM-Verteilung in mg/l, 29.08.2002, 00:00 Uhr.

In den folgenden 5-6 Wochen breitet sich Schwebstoff geringer Konzentration bei überwiegend nördlichen bis östlichen Winden in der südlichen Deutschen Bucht aus, das lokale Maximum im unteren Flusslauf sinkt jedoch auf Werte von 16 mg/l (siehe Abbildung 18, Verteilung am 06.10.2002).

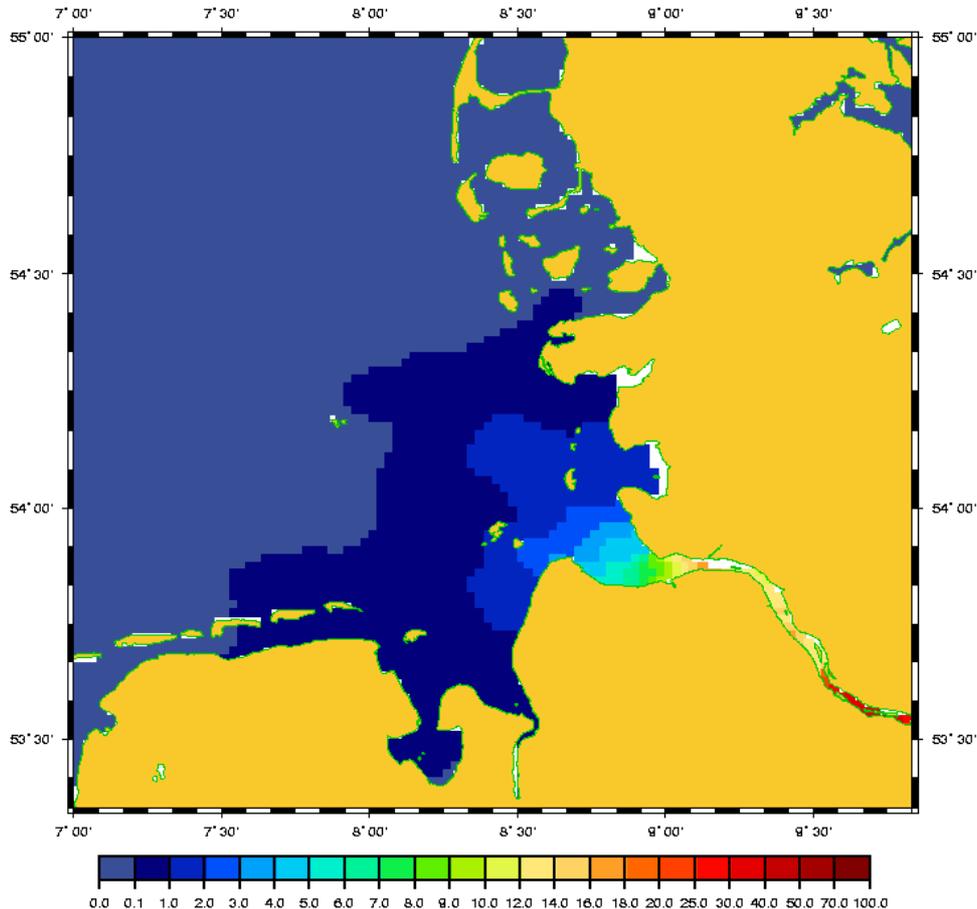


Abbildung 18: Oberflächen-SPM-Verteilung in mg/l, 06.10.2002, 00:00 Uhr.

Im November verlagert sich der Ort des Maximums bei südlichen bis westlichen Winden entlang der nordfriesischen Küste nach Norden, ohne dass zunächst nennenswerte Schwebstoffmengen in der Elbe nachgeführt werden. Erst Ende November bildet sich bei steigenden Süßwassereinträgen ein neues Maximum mit immer größer werdenden Konzentrationen (anfangs 20-25 mg/l) in der Trübungszone aus.

Abbildung 19 zeigt die Verteilung am 11.12.2002, 00:00 Uhr. Zu diesem Zeitpunkt beträgt die maximale SPM Konzentration im Mündungsbereich 30-40 mg/l. Die bevorzugte Ausbreitungsrichtung ist nördlich mit dem küstenparallelen Strom. Bei Büsum sind noch Konzentrationen von ca. 5 mg/l zu beobachten, weiter nördlich bei Amrum noch Werte von 1 mg/l.

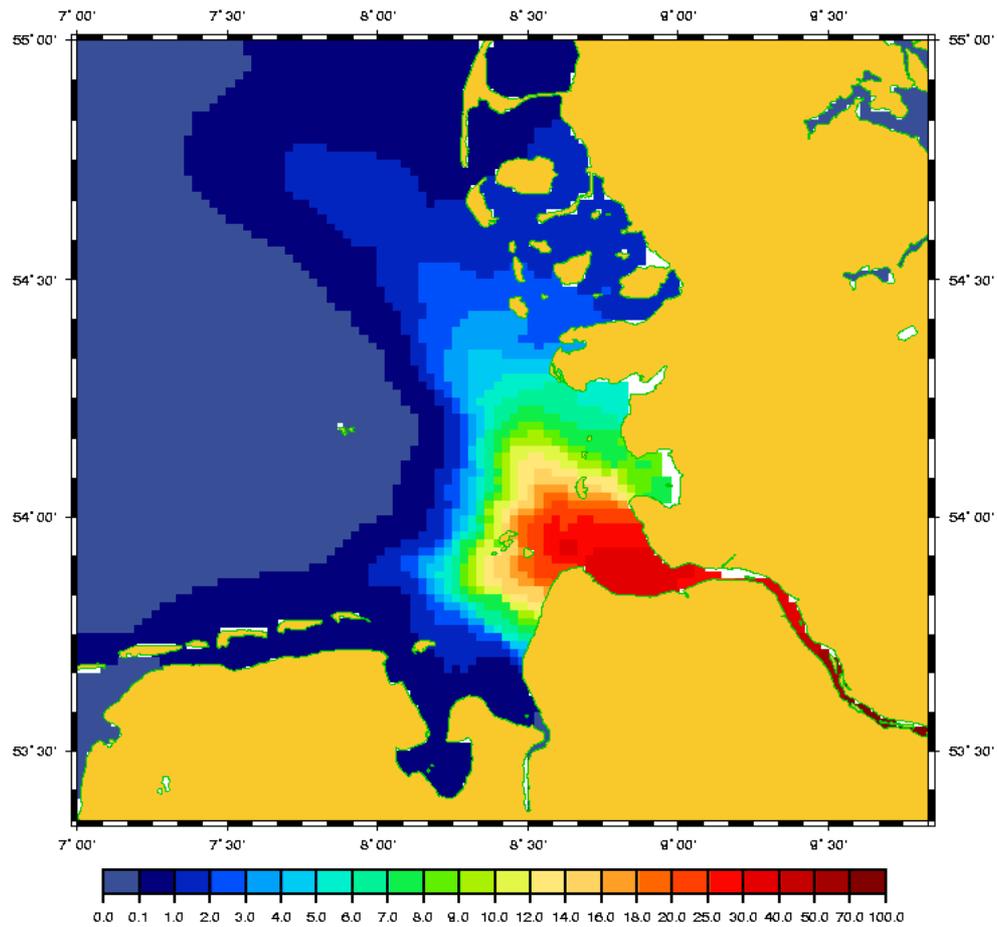


Abbildung 19: Oberflächen-SPM-Verteilung in mg/l, 11.12.2002, 00:00 Uhr.

#### 4.4 Fallstudie zur Ausbreitung von Baggergut

In diesem Szenario wird die Ausbreitung von SPM in der südlichen Ostsee verfolgt, das bei einer angenommenen Baggerung etwa 8 Seemeilen nördlich von Warnemünde in die oberste Wasserschicht des Modells (Dicke 8 m) eingeleitet wird. Es handelt sich hierbei nicht um Untersuchungen zu realen Baggermaßnahmen oder Verklappungen sondern um ein fiktives Szenario.

Der Simulationszeitraum beträgt 7 Tage, beginnend am 11.01.2003, 00:00 Uhr. An einem Gitterpunkt des Modells (Punkt 127,215 im 1 sm Raster) werden zwischen dem 11.01.2003, 15:00 Uhr und dem 13.01.2003, 00:00 Uhr zu jedem Modellzeitschritt (900 Sekunden) Konzentrationen von je 20 mg/l für jede der 3 SPM Fraktionen eingegeben. Im Simulationszeitraum dominierten westliche Winde, die zu ostwärts gerichteten küstenparallelen Strömungen führten.

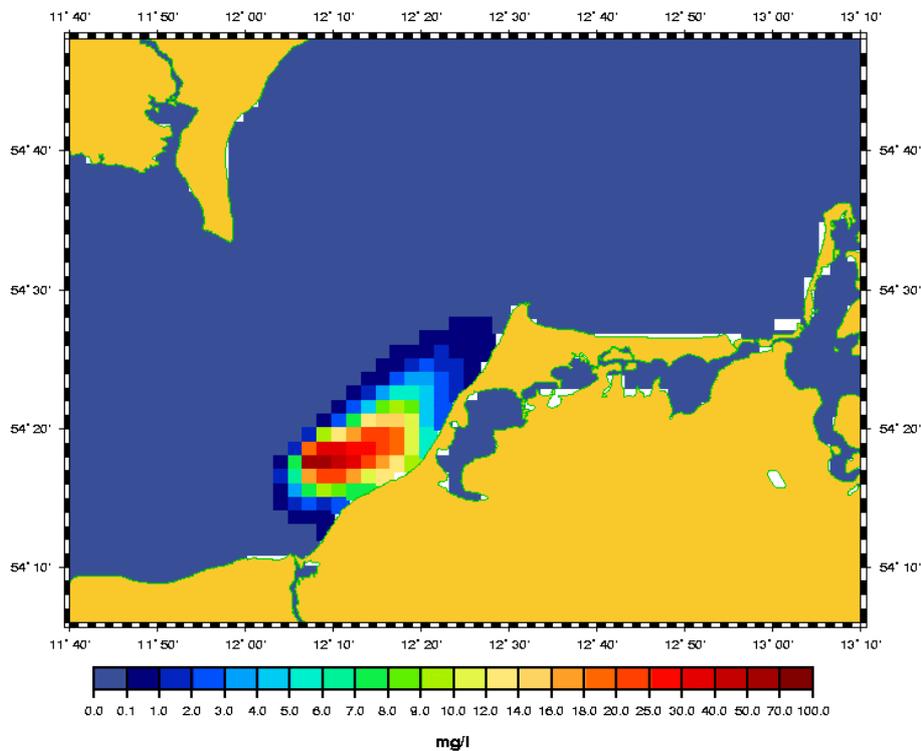


Abbildung 20: Oberflächen-SPM-Verteilung in mg/l, 13.01.2003, 00:00 Uhr.

Die folgenden Bilder zeigen die SPM-Konzentrationen in der Oberflächenschicht zum letzten Zeitpunkt der Einleitung, 3 Tage später sowie am Ende der Simulation.

Während der 2 Tage andauernden Einbringung hat sich eine nordöstlich ausgerichtete ellipsenförmige Schwebstoff Wolke von ca. 20 sm Länge ausgebildet (Abb. 20), die anschließend mit dem küstenparallelen Strom weiter nach Nordosten treibt.

Nach dem Passieren des Darss (Abb. 21) bleibt der Kern der Wolke in Küstennähe bis zum Erreichen der Bucht vor Hiddensee (Abb. 22). Die Konzentration hat von den ursprünglich eingeleiteten 60 mg/l abgenommen und beträgt im Kern noch 12 mg/l.

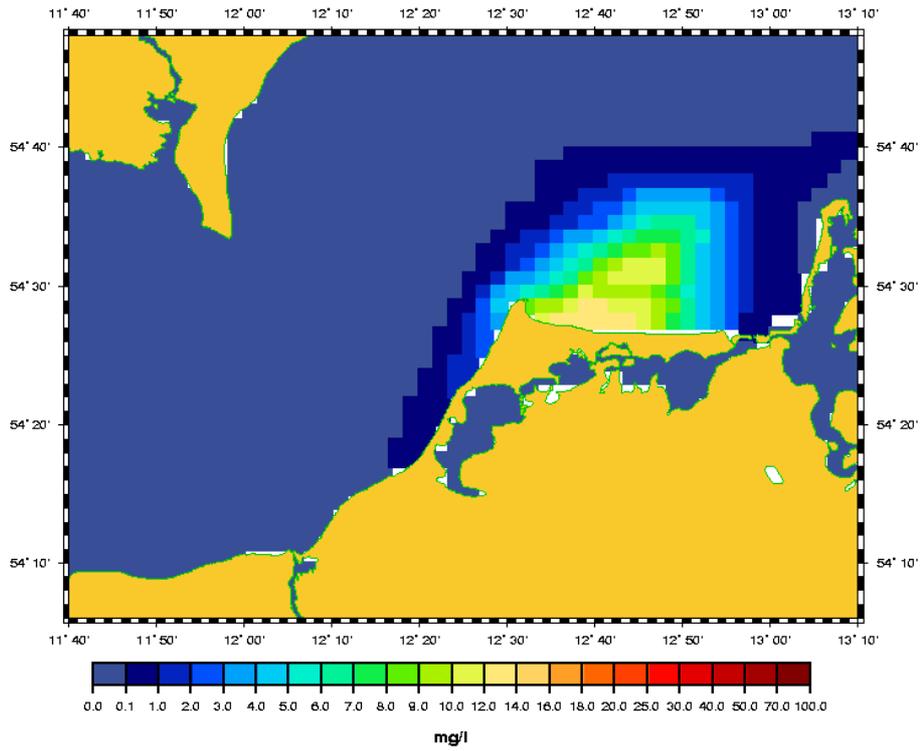


Abbildung 21: Oberflächen-SPM-Verteilung in mg/l, 16.01.2003, 00:00 Uhr.

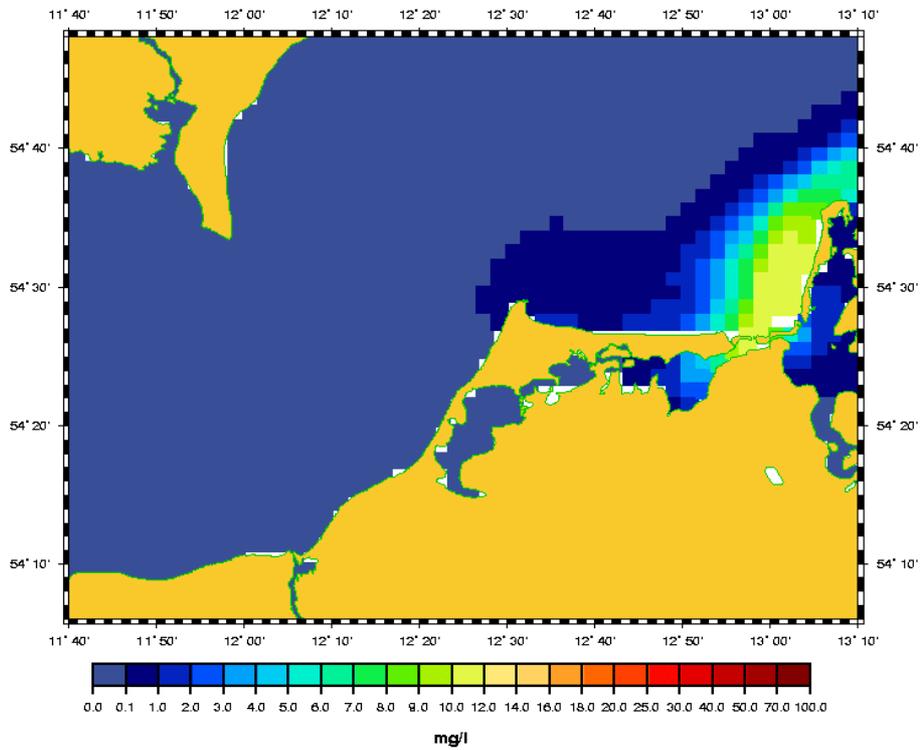


Abbildung 22: Oberflächen-SPM-Verteilung in mg/l, 18.01.2003, 00:00 Uhr.

#### 4.5 Simulation von fiktiven Unfallszenarien für an Schwebstoffe gebundene Schadstoffe

In diesem fiktiven Unfallszenario wird die Ausbreitung von an SPM gebundenen Schadstoffen in der Nordsee, eingeleitet 12 Seemeilen südwestlich von Amrum, simuliert.

Dabei wird ca. 4 Tage lang Schwebstoff mit Konzentrationen von je 33 mg/l für jede der 3 SPM Fraktionen in die oberste Wasserschicht (Dicke 8 m) eines Modellgitterpunktes (Punkt 114,74 im 6 sm Raster bzw. Punkt 110,67 im 1 sm Raster) eingeleitet.

Die Einleitung beginnt 15 Minuten nach dem Start des Modell-Laufs am 25.01.2000 00:00 Uhr und endet am 29.01.2000 00:00 Uhr. Während des 12tägigen Simulationszeitraums dominierten teilweise stürmische Winde aus westlichen Richtungen.

Die erste der folgenden Abbildungen zeigt die Konzentrationen (Summe aller 3 Fraktionen) der nierenförmigen Schwebstoffwolke 11.75 Stunden nach Beginn der Einleitung. Die primäre Ausbreitungsrichtung ist längs der Achse Südost-Nordwest, das Massenzentrum liegt in südwestlicher Richtung vom Ort der Einbringung.

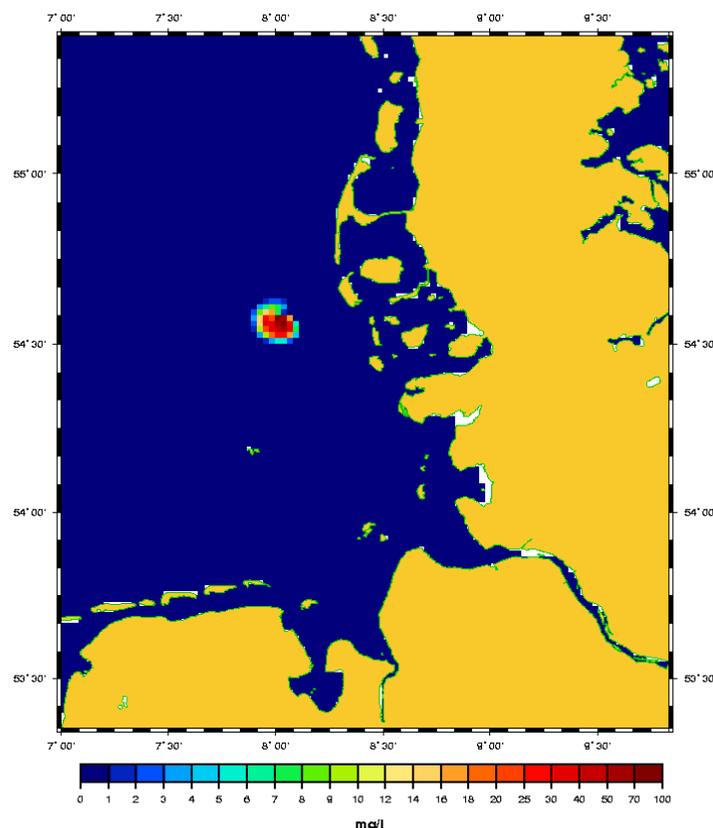


Abbildung 23: Oberflächen-SPM-Verteilung in mg/l, 25.01.2000, 12:00 Uhr.

4 Tage später, am 29.01.2000 12:00 Uhr, 12 Stunden nach dem Ende der Einleitung, zeigt die 2. Abbildung, dass sich das Wolken-Zentrum vom Ort der Einleitung in nordöstlicher Richtung entfernt hat. Der Rand der nun langgestreckten, Südwest-Nordost ausgerichteten Wolke hat die Insel Sylt erreicht. Die höchsten Konzentrationswerte sind von 100 mg/l auf ca. 70 mg/l zurückgegangen.

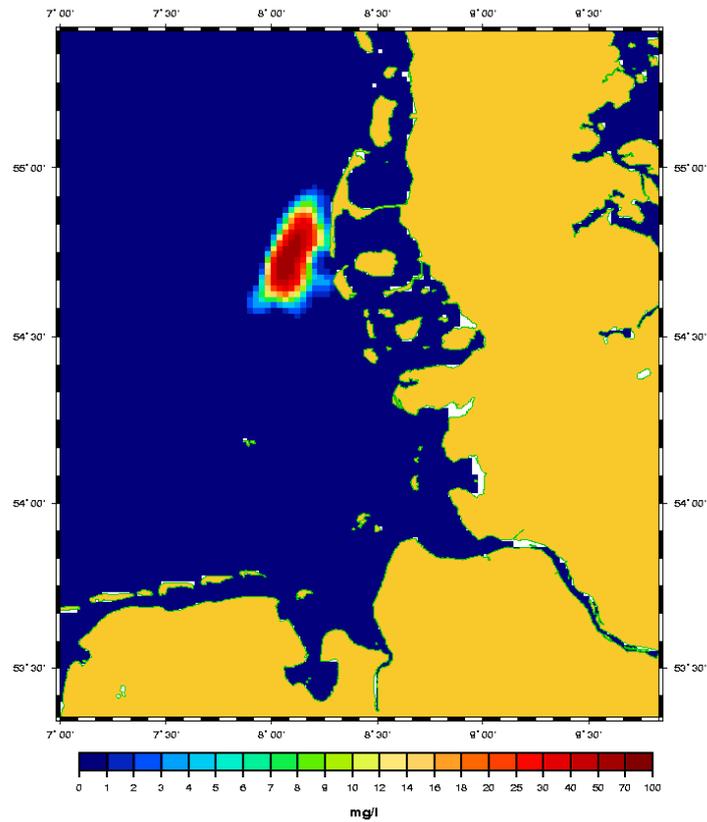


Abbildung 24: Oberflächen-SPM-Verteilung in mg/l, 29.01.2000, 12:00 Uhr.

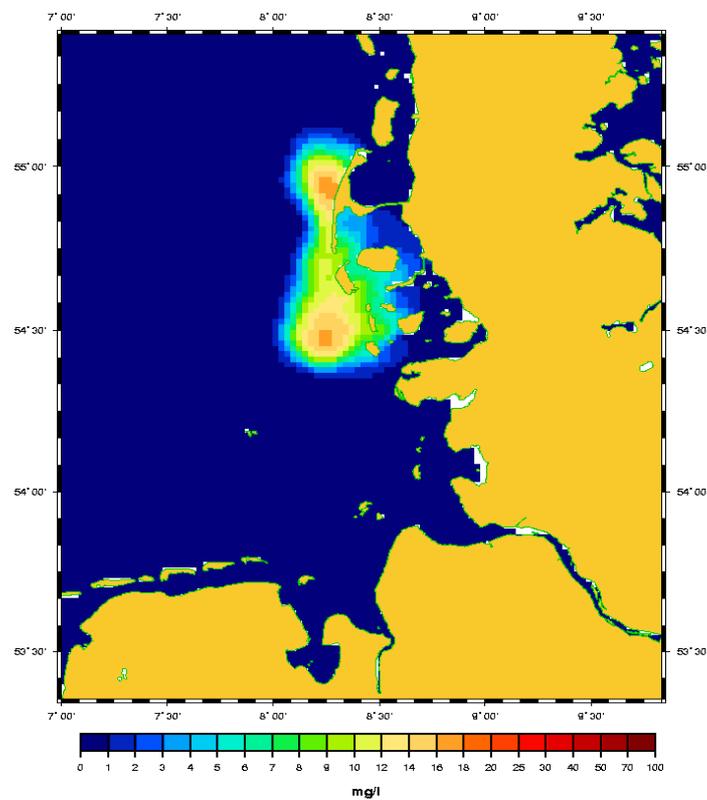


Abbildung 25: Oberflächen-SPM-Verteilung in mg/l, 06.02.2000, 00:00 Uhr.

Das 3. Bild zeigt die Situation am 06.02.2000 00:00 Uhr am Ende der Simulation nach 12 Tagen. Die Wolke wurde zwischenzeitlich auf Höhe des Hörnum Beckens in zwei Teile getrennt. Der Kern des nördlichen Teils liegt vor der Küste der Mitte von Sylt, der Kern des südlichen Teils etwa 10 Seemeilen süd-südwestlich von Amrum. In beiden Teilen liegt das Konzentrationsmaximum bei ca. 18 mg/l.

## 5 Zusammenfassung

Das erweiterte Transportmodell des BSH ermöglicht es, die vertikale und horizontale SPM Verteilung von 3 typischen Fraktionen in Abhängigkeit von Seegangs- und Strömungsdynamik zu berechnen.

Die numerische Beschreibung der physikalischen Austauschprozesse durch Erosion, Sedimentation, Resuspension, Bioturbation und Diffusion entstammt in den Grundzügen einem quasi-3D Modell. Dabei mussten die dort verwendeten analytischen vertikalen Verteilungsprofile ersetzt bzw. ergänzt werden durch Gleichungen mit einer expliziten Tiefenabhängigkeit.

Die Berechnungsergebnisse des Transportmodells hängen zudem wesentlich von der Anfangsverteilung des Schwebstoffs im Bodensediment ab. Dazu wurden digitale Verteilungsdatensätze des prozentualen Anteils des Schwebstoffs für die Nord- und Ostsee erstellt. Die Datenlage erlaubte eine erfolgreiche Bearbeitung in dem Gebiet der Nordsee, insbesondere der Deutschen Bucht. Im Ostseeraum östlich von Bornholm lagen keine Daten vor.

Obwohl die SPM-Mengen durch Flusseinträge nur einen geringen Anteil des Gesamtbudgets ausmachen, sind sie jedoch wichtig zum Beispiel für die Berechnungen von Schwebstoffausbreitungen mit dem küstenparallelen Strom in angrenzende Watt-Gebiete. Insgesamt konnten die SPM Einträge von 51 der 79 Flüsse bestimmt werden, die im Modell berücksichtigt werden. Die Angaben zu den restlichen wurden den Wasserdurchflussmengen entsprechend geschätzt.

Ähnliches gilt für die bekannte Gesamtmenge des Schwebstoffs, die durch Erosion an den Englischen Kliffs dem Modell zugeführt wird. Diese Erosion wurde mit Hilfe einer Seegangstatistik zeitlich variabel in Abhängigkeit des lokalen Seegangs gestaltet.

Szenarienrechnungen und Modellierungen längerer Zeiträume von mehreren Wochen bis Monaten ergaben, dass z.B. die aus Beobachtungen bekannten Muster der SPM-Oberflächenverteilung wiedergegeben werden.

Die Validierung des Modells durch Vergleich mit Messdaten ergab, dass generell die Modellergebnisse gut mit den Messwerten übereinstimmen. So werden die maximalen SPM-Konzentrationen der Bodenschicht an einem Rechenpunkt bei Helgoland bei stürmischen Wetterlagen sehr gut wiedergegeben, während bei ruhigen Wetterverhältnissen die Konzentrationen geringfügig überschätzt werden. Die Konzentrationsschwankungen im Modell werden bei Sturmereignissen etwas unterschätzt. Näher untersucht werden muss noch der im Vergleich zu der Mess-Zeitreihe verzögerte Anstieg und Abfall der berechneten Konzentrationen.

## 6 Literatur

- Brandt, M. (1996): Sedimenttransport i svenska vattendrag, exempel fraan 1967-1994. SMHI-Hydrologi Nr 69.
- Dick, S., E. Kleine, S. H. Müller-Navarra, H. Klein, H. Komo (2001): The Operational Circulation Model of BSH (BSHcmod) – Model description and validation. Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie, Nr. 29, 49 pp.
- Hetscher, M., H. Krawczyk, A. Neumann, T. Walzel and G. Zimmermann (1998): Capabilities for the retrieval of coastal water constituents (case II) using multispectral satellite data, *Int. Symp. on Rem. Sens.*, Barcelona, Spain, in *Proc. of SPIE* Vol. 3496.
- Kleine, E. (1993): Die Konzeption eines numerischen Verfahrens für die Advektionsgleichung - Literaturübersicht und Details der Methode im operationellen Modell des BSH für Nordsee und Ostsee, Techn. Bericht d. Bundesamtes f. Seeschifffahrt u. Hydrographie, 106 S.
- Müller-Navarra S. H., K. Huber, H. Komo (1999): Model Simulations of the Transport of Odra Flood Water through the Szczecin Lagoon into the Pomerian Bight in July/August 1997. *Acta hydrochim. hydrobiol.* 27 5, 364 – 373.
- Nies, H., H. Gaul, F. Oestereich, H. Albrecht, S. Schmolke, N. Theobald, G. Becker, A. Schulz, A. Frohse, S. Dick, S. Müller-Navarra, K. Herklotz (2003): Die Auswirkungen des Elbehochwassers vom August 2002 auf die Deutsche Bucht. Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie, Nr. 32, 81 pp.
- OSPAR (2002): Data Report on the Comprehensive Study of Riverine Inputs and Direct Discharges (RID) in 2000. OSPAR Commission 2002.
- Pleskachevsky, A., J. Horstmann, W. Rosenthal (2001): Modeling of sediment transport in synergy with ocean colour data, *4<sup>th</sup> Berlin Workshop on Ocean Remote Sensing „5 Years of MOS-IRS“*, May 30-01 June, 2002, Wissenschaft und Technik Verlag, Berlin, 177-182.
- Pleskachevsky, A., G. Gayer, W. Rosenthal (2002): Numerical modelling of suspended matter transport, *11<sup>th</sup> International Biennial Conference on Physics of Estuaries and Coastal Seas*, 17-20 September 2002, Hamburg, 476-479.
- Puls, W., T. Pohlmann and J. Sündermann (1997): Suspended particulate matter in the southern North Sea: Application of a numerical model to extend NERC North Sea project data interpretation, *Dt. hydr. Z.*, 49(2/3), 307-327.
- Soulsby, R. (1997): Dynamics of marine sands. A manual for practical application. Thomas Telford Services Ltd, London.
- Zwolsman, J.J.G. (1994): Contaminant retention in North Sea estuaries, Delft Hydraulics T1233.

**Autoren:**

Gerhard Gayer \*                    +49 – 4152 – 87 1506                    gerhard.gayer@gkss.de

Stephan Dick \*\*                    +49 – 40 – 3190 3130                    stephan.dick@bsh.de

Andrei Pleskachevsky\*            +49 – 4152 – 87 1523                    andrei@gkss.de

Wolfgang Rosenthal\*            +49 – 4152 – 87 1516                    rosenthal@gkss.de

\*            GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH  
              Max-Planck-Straße  
              D-21502 Geesthacht

\*\*           Bundesamt für Seeschifffahrt  
              und Hydrographie  
              Bernhard-Nocht-Str. 78  
              D-20359 Hamburg