

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Kösters, Frank; Grabemann, Iris; Schubert, Reiner**

## **Die Schwebstoffdynamik in der Trübungszone des Weserästuars**

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106376>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Kösters, Frank; Grabemann, Iris; Schubert, Reiner (2018): Die Schwebstoffdynamik in der Trübungszone des Weserästuars. In: Die Küste 86. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 425-442.

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

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

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



# Die Schwebstoffdynamik in der Trübungszone des Weserästuars

Frank Kösters, Iris Grabemann und Reiner Schubert

## Zusammenfassung

In der Trübungszone eines Ästuars schwanken die hohen Schwebstoffkonzentrationen auf unterschiedlichen Zeitskalen. Damit der hohen Schwebstoffkonzentration auch hohe Sedimentationsraten und eine Verschlickung von Hafenanlagen verbunden sein können, ist ein umfassendes Systemverständnis zur Optimierung des Sedimentmanagements notwendig. Auf der Basis von zurückliegenden Messkampagnen und Daten aus Dauermessungen wird die Variabilität der Trübungszone auf intratidalen Zeitskalen, dem Spring-Nipp-Zyklus und verbunden mit Änderungen des Oberwasserabflusses (saisonale Zeitskala) untersucht und mit Modellergebnissen verglichen. Vorhergehende Ergebnisse, die die intratidale Variabilität als zyklischen Prozess aus Advektion suspendierten Materials, Deposition und Resuspension beschreiben, werden auf Basis der aktuellen Ergebnisse bestätigt. Eine starke Kopplung von Brackwasserzone und Trübungszone ist nicht nur auf der intratidalen Zeitskala sichtbar, sondern auch auf längeren Zeitskalen als Reaktion auf geänderte Oberwasserabflüsse. Der Spring-Nipp-Zyklus zeigt sich in den Schwebstoffkonzentrationen, die bei Springtide deutlich größer sind als bei Nipptide, und geringfügig in der Ausdehnung der Trübungszone.

## Schlagwörter

Schwebstofftransport, Weserästuar, Trübungszone, Brackwasserzone

## Summary

*The estuarine turbidity maximum zone (ETM) of high suspended sediment concentration is highly variable on different time scales. As the ETM is closely linked to river siltation problems, an improved understanding can help to optimise sediment management within the estuary. Variability on intratidal, spring-neap and river discharge-related (seasonal) time scales is reviewed based on data from older measurements and recent monitoring and compared with modelling results. Previous results describing intratidal dynamics as a cyclic process of advection, deposition and resuspension are corroborated. Strong coupling is evident between the ETM and the mixing zone, not only on the intratidal movement but also as a shift of both in reaction to changes in river discharge. Spring-neap variations are mainly evident as changes in suspended sediment concentration and small changes in the ETM extension.*

## Keywords

*suspended sediment transport, Weser estuary, estuarine turbidity maximum, mixing zone*

## Inhalt

1	Einleitung .....	426
2	Regionale Verhältnisse .....	427
3	Materialien und Methoden .....	429
3.1	Messungen.....	429
3.2	Numerisches Modellierungssystem.....	430
4	Ergebnisse und Diskussion .....	431
4.1	Variabilität im Tidezyklus .....	431
4.2	Variabilität im Spring-Nipp-Zyklus.....	434
4.3	Variabilität in Abhängigkeit vom Oberwasserabfluss .....	436
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	438
6	Danksagung.....	439
7	Schriftenverzeichnis.....	439

## 1 Einleitung

In Ästuaren wie dem Weserästuar werden in jedem Tidezyklus große Mengen an Sedimenten resuspendiert, transportiert und zum Teil abgelagert. Dies führt häufig zur Ausbildung von Regionen mit relativ hoher Konzentration von suspendierten Sedimenten (englisch: Suspended Particulate Matter, SPM). In dieser Trübungszone (englisch: Estuarine Turbidity Maximum, ETM) sind oft hohe Verschlickungsraten zu beobachten. So haben DE NIJS et al. (2009) gezeigt, dass im Hafen von Rotterdam tidebedingte Variationen der Lage des ETM die dominierenden Vorgänge bei der Verschlickung von Hafenanlagen darstellen. SCHROTTKE et al. (2006) stellen fest, dass die Flüssigschlickbildung in der Region der Trübungszone die nautische Tiefe des Fahrwassers potenziell beeinflusst. In der Trübungszone eines Flusses sind daher möglicherweise umfassende Unterhaltungsbaggerungen zur Beseitigung von Mindertiefen erforderlich, wie von LANGE et al. (2008) für das Weserästuar gezeigt.

Bei der Untersuchung der Dynamik von Trübungszone muss zwischen verschiedenen Prozessen und Zeitskalen unterschieden werden. Auf saisonalen oder mehrjährigen Zeitskalen betrachtet wird die Entstehung und Aufrechterhaltung einer Trübungszone durch Prozesse bestimmt, die zur Akkumulation von Feinsedimenten führen. Kürzere, sub-tidale oder tidale Zeitskalen hingegen beschreiben die Dynamik der Entstehung der Trübungszone, sobald lokale Sedimentquellen vorhanden sind. Entstehung und Aufrechterhaltung der Trübungszone hängen von verschiedenen Mechanismen ab, deren Auswirkungen je nach Ästuar und Umweltbedingungen (z. B. hoher oder niedriger Oberwasserabfluss) variieren können. Zu diesen Prozessen zählt beispielsweise die residuelle „ästuarine Zirkulation“ aufgrund des am Boden einströmenden Salzwassers (z. B. FESTA und HANSEN 1978). Ein anderer Mechanismus ist der Netto-Stromaufwärtstransport von Sedimenten infolge höherer maximaler Flutstromgeschwindigkeiten als Ebbstromgeschwindigkeiten (englisch: „tidal pumping“, s. z. B. OFFICER 1981) und Veränderungen der Effizienz der vertikalen Vermischung durch eine salzgehaltsabhängige Schichtung („tidebedingte Vermischungssasymmetrie“, z. B. JAY und MUSIAK 1994). In einigen Ästuaren ist die Bildung einer zweiten

Trübungszone weiter stromauf der Brackwasserzone möglich (z. B. im Emsästuar, s. TALKE et al. 2009). Ein allgemeiner Überblick über die relevanten Prozesse findet sich unter anderem bei DYER (1997).

Auf die Bedeutung lokaler Sedimentquellen und ihrer Resuspension innerhalb des Tidezyklus wurde für das Weserästuar bereits von WELLERSHAUS (1982) hingewiesen. Eine ausführliche, auf Messungen basierende Beschreibung der intratidalen Verlagerung von Schwebstoff ist bei RIETHMÜLLER et al. (1988) sowie GRABEMANN und KRAUSE (1989) zu finden. Die Ergebnisse wurden von LANG et al. (1989) und LANG (1990) unter Verwendung eines numerischen Modells bestätigt. Auf längeren Zeitskalen variiert die Lage der Trübungszone im Weserästuar zusammen mit der Lage der Brackwasserzone als Reaktion auf geänderte Oberwasserabflüsse (GRABEMANN und KRAUSE 1989, GRABEMANN und KRAUSE 2001). Diese oberwasserabhängigen Veränderungen der Lage der Trübungszone sind bisher noch nicht in numerischen Modellen des Weserästuars reproduziert worden.

Nachfolgend wird die Dynamik der Trübungszone im Weserästuar auf unterschiedlichen Zeitskalen auf der Grundlage früherer Studien, der Auswertung von neuen Messungen und numerischer Modellergebnisse untersucht. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der intratidalen Verschiebung suspendierten Sediments, der Variabilität im Spring-Nipp-Zyklus und der vom Oberwasserabfluss abhängigen Veränderungen der Lage der Trübungszone. Die vorliegende Studie bestätigt die Ergebnisse früherer Untersuchungen, die auf Messungen basierten und die Variabilität der Trübungszone auf verschiedenen Zeitskalen beleuchteten.

## 2 Regionale Verhältnisse

Das Weserästuar (Abb. 1) liegt in der südöstlichen Nordsee. Im Allgemeinen ist es ein gut durchmischtes meso- bis makrotidales Ästuar. Der oberstromige Abschnitt (Km 0-65) zwischen Bremen und Bremerhaven hat den Charakter eines Kanals und wurde in der Vergangenheit wiederholt vertieft; die Mindesttiefe des Fahrwassers beträgt heute etwa 9 m unter Seekartennull (SKN -9 m) (siehe Übersichtsarbeit von LANGE et al. 2008). Die trichterförmige Außenweser (Km 65-120) besteht aus zwei tiefen Tiderinnen, ausgedehnten Wattflächen sowie einer Vielzahl kleinerer Tiderinnen und Priele. Die westliche Rinne wurde durch wasserbauliche Maßnahmen (Bau von Leitdämmen und Bühnen) als dauerhaftes Fahrwasser in der Lage stabilisiert. Eine Mindesttiefe von etwa SKN -14 m wird permanent aufrechterhalten. Außerhalb dieses künstlich stabilisierten Bereichs lassen sich starke morphologische Veränderungen beobachten (z. B. DIECKMANN 1989).

Als Oberflächensedimente im Fahrwasser dominieren Sande. Die Sohle der Außenweser besteht in erster Linie aus Feinsanden und Mittelsanden und in der Unterweser aus Mittelsanden mit Grobsandanteilen. Eine augenfällige Ausnahme bildet der Bereich zwischen Km 55 und Km 66, in dem sich vorwiegend Feinsedimente befinden (mittlere Korngröße  $<63 \mu\text{m}$ ), die aus Schluff und Ton mit unterschiedlichen Anteilen organischer Materie bestehen. Dieser Abschnitt liegt im Gewässerabschnitt von etwa Km 45 bis etwa Km 70, in dem üblicherweise die Trübungszone liegt. Die Zusammensetzung der Sedimente im schluffigen Bereich ist zeitlich nicht konstant. Auf tidalen Zeitskalen ist die Ausbildung von Flüssigschlickzonen möglich (SCHROTTKE et al. 2006), während auf längeren Zeitskalen die Schluffanteile variieren können. Nach hohen Oberwasserabflüssen

nimmt die Schluffmenge ab und während länger anhaltender niedriger Oberwasserabflüsse wieder zu.

Der langfristige mittlere Abfluss (MQ, Mittel für die Jahre 1970 bis 2010) beträgt  $325 \text{ m}^3/\text{s}$ ; die langfristigen Mittel niedriger Abflüsse (MLQ) und hoher Abflüsse (MHQ) liegen bei  $117 \text{ m}^3/\text{s}$  beziehungsweise  $1220 \text{ m}^3/\text{s}$ . Die Messungen erfolgten am Pegel Intschede  $32,5 \text{ km}$  stromauf des Tidewehrs (DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH 2013). Eine Analyse der täglichen Abflusswerte für den Zeitraum 1955-2012 zeigt, dass ein Abfluss von  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  am häufigsten vorkommt; in 50 % beziehungsweise 75 % der Fälle liegt der Abfluss zwischen  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $250 \text{ m}^3/\text{s}$  beziehungsweise  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ .

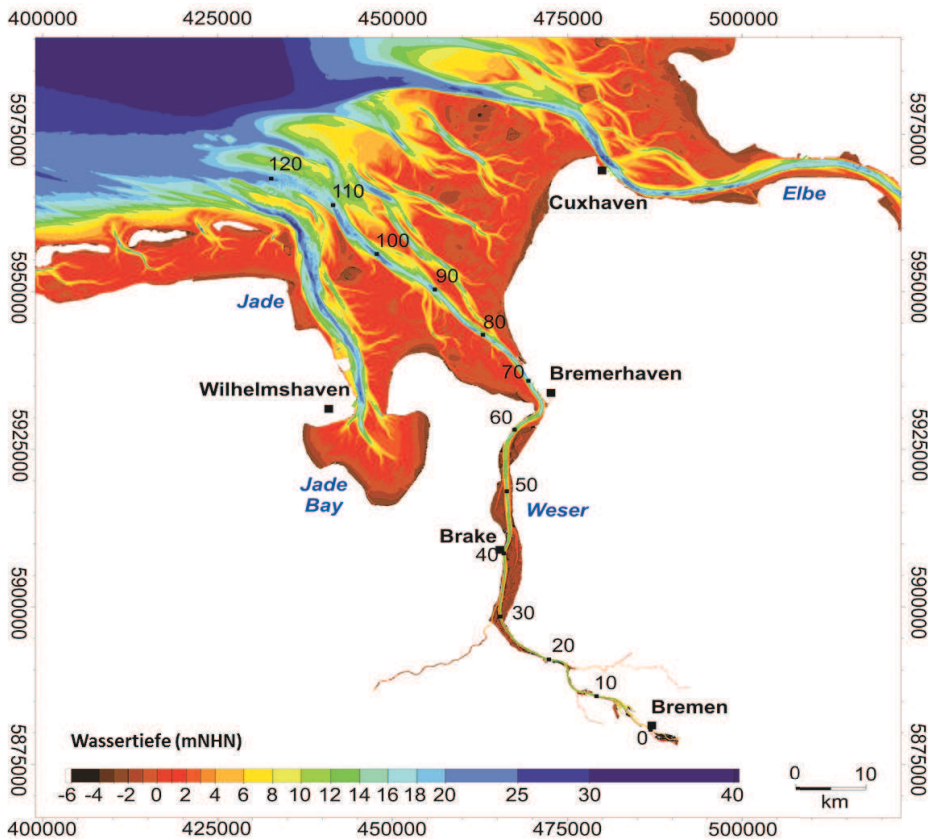


Abbildung 1: Morphologie des Weserästuars. Die Zahlen entlang des Hauptfahrwassers zeigen die Entfernung von der Wilhelm-Kaisen-Brücke („Große Weserbrücke“) etwa 5 km stromab des Wehrs in Bremen.

Die langfristige mittlere SPM-Konzentration des Oberwassers lag im Zeitraum von 1970 bis 2010 bei  $38 \text{ g}/\text{m}^3$  (DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH 2013). Der langfristige mittlere Flusseintrag von Schwebstoff in das Ästuar beträgt somit etwa 450 Tonnen je Halbtide; auf einer jährlichen Zeitskala variiert er signifikant. Die Menge des see-seitig eingetragenen suspendierten Sediments ist unbekannt, es wurden jedoch

Vorkommen marinen Materials stromauf der Brackwasserzone festgestellt (z. B. IRION et al. 1987). Innerhalb der Trübungszone erhöht sich die Schwebstoffkonzentration mit zunehmender Tiefe für den überwiegenden Teil des Tidezyklus (z. B. RIETHMÜLLER et al. 1988, Abb. 3 und 4; s. a. Abb. 2 in diesem Kapitel). In Bodennähe kann die Konzentration  $1000 \text{ g/m}^3$  überschreiten. Außerhalb der Trübungszone beträgt die SPM Konzentration im Allgemeinen weniger als  $50 \text{ g/m}^3$ .

Die Trübungszone befindet sich überwiegend im landseitigen Bereich der Brackwasserzone. Die vom Oberwasserabfluss abhängige Lage der landseitigen Grenze der Brackwasserzone wird durch die tidegemittelte Grenzfläche zwischen salzarmen Flusswasser und salzreichem Meerwasser definiert; in der Weser erfolgt ihre Bestimmung üblicherweise auf Grundlage der 2-PSU-Isohaline. Bei niedrigen Oberwasserabflüssen kann die landseitige Grenze der Brackwasserzone um etwa 15 km weiter stromauf liegen als unter MQ-Bedingungen (SEIFFERT et al. 2012). Unter typischen Sommerbedingungen nach einigen Wochen mit niedrigem Oberwasserabfluss zeigt eine Momentaufnahme der bei Flut gemessenen Schwebstoffkonzentrationen die Trübungszone zwischen Km 45 und Km 65 (Abb. 2).

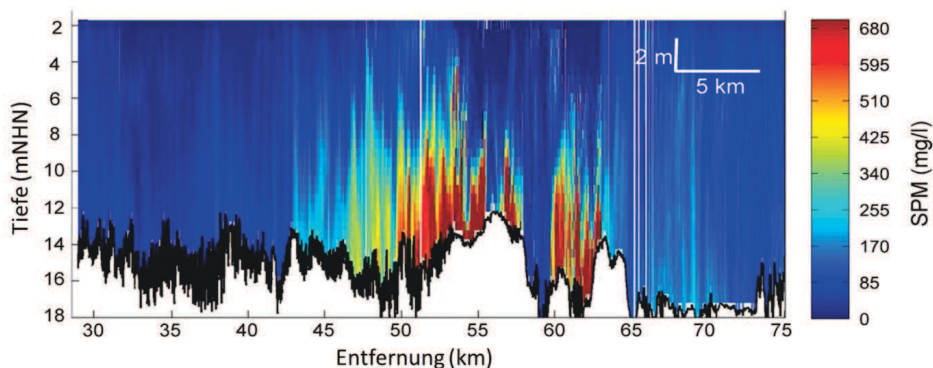


Abbildung 2: Darstellung der SPM-Konzentration bei Flut im Juni 2009 während einer Fahrt von Bremerhaven nach Bremen entlang eines Längsschnitts des Weserästuars (AquaVision BV 2009). Die Messungen erfolgten nicht tidephasengleich.

Die Lage der Brackwasserzone und der Trübungszone wird auch durch den mittleren Meeresspiegel beeinflusst. In einer Sensitivitätsstudie zu den möglichen Auswirkungen eines Klimawandels fanden HOLZWARTH et al. (2011) bei einem Anstieg des mittleren Meeresspiegels um 80 cm eine Verschiebung der Brackwasserzone um mehr als 3 km stromaufwärts und damit verbunden eine stromaufwärts gerichtete Verlagerung der Trübungszone in derselben Größenordnung.

### 3 Materialien und Methoden

#### 3.1 Messungen

Das Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Bremerhaven führt langfristige oberflächennahe Zeitreihenmessungen der Trübung durch, die im Jahr 2002 mit zunächst einer Messstation begannen. Seit 2011 sind neun Stationen in Betrieb. Zudem wurden Ende der 1990er

Jahre sowie 2002 und 2003 Zeitreihenmessungen durchgeführt, um zeitgleich die Trübung sowie den Salzgehalt und die Strömungsgeschwindigkeit in zwei bis drei verschiedenen Wassertiefen an drei bis sechs Stellen im Ästuar zu bestimmen. Die Messungen erfolgten jeweils über einen Zeitraum von wenigen Wochen und bei niedrigem, mittlerem und hohem Oberwasserabfluss. An jeder Messstation wurde die Trübung für den Median, das 5 %-Perzentil sowie das 95 %-Perzentil für vorgegebene Oberwasserabflussintervalle berechnet. Anschließend wurden die Messdaten mit den mittleren Abflussbedingungen normalisiert. Die aus dieser Analyse der Einzelstationen entlang des Weserfahrwassers gebildeten Längsprofile bilden die Grundlage für die Schätzung der Ausdehnung der Trübungszone. Dabei wurde für die Trübung ein Schwellwert von 0,6 festgelegt. Für die Datenanalyse erfolgte eine Aufteilung in oberflächennahe Messungen (für die Jahre 2008-2012 an 8-9 Messstationen, MES\_Surf in Abb. 7) und bodennahe Messungen (für die Jahre vor 2003, MES\_Depth in Abb. 7).

### 3.2 Numerisches Modellierungssystem

Der Schwebstofftransport im Weserästuar wurde mit dem gekoppelten Modellierungssystem UnTRIM-SediMorph simuliert. Das hydrodynamische Modell UnTRIM (CASULLI und ZANOLLI 2005) verwendet ein Finite-Differenzen- bzw. Finite-Volumen-Verfahren, mit dem die Impuls- und Transportgleichungen auf einem horizontal unstrukturierten Gitter gelöst werden. Das Modell wurde dreidimensional mit einer mittleren räumlichen Auflösung, die sich von etwa 180 m in der Außenweser auf 60 m in den inneren Bereichen des Ästuars erhöht, und einer vertikal konstanten Auflösung von 1 m aufgesetzt.

Das hydrodynamische Modell ist an das von der BAW entwickelte Sedimenttransportmodell SediMorph gekoppelt (BAW 2005). Für die einzelnen Kornfraktionen wird die Form des Sedimenttransports entweder als Suspensionstransport oder Geschiebetransport vorgegeben. Die Modellierung suspendierter Sedimente erfolgt in der vorliegenden Studie mit Hilfe drei verschiedener Korngrößenklassen (Feinschluff, Mittelschluff, Grobschluff). Für den Geschiebetransport werden vier Kornfraktionen zugrunde gelegt (Feinsand, Mittelsand, Grobsand und Kies). Die Auswahl der Korngrößen erfolgte gemäß der Udden-Wentworth-Skala. Trockendichte und Porosität sind konstant als 2.650 kg/m<sup>3</sup> beziehungsweise 40 % gesetzt. Sedimente, deren Durchmesser größer als der von Kies ist, beispielsweise Steine, werden als Kies klassifiziert. Feinere Fraktionen als Feinschluff werden dieser Korngrößenklasse zugeordnet. Auf Basis der räumlich variablen Sedimentverteilung werden charakteristische Werte wie die mittlere Korngröße berechnet, um die Kornrauheit zu bestimmen. Die Formrauheit von kleinskaligen Sohlformen wird ebenfalls berücksichtigt. SediMorph berechnet die Depositions- und Erosionsflüsse von suspendierten Sedimenten auf Grundlage der Sohl Schubspannung, die ihrerseits aus der angreifenden Strömung und der Rauheit berechnet wird. Veränderungen der Sohle werden in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Die Modelltopographie repräsentiert den Zustand im Jahr 2002, sodass Kompatibilität mit den verfügbaren Messungen am seeseitigen Modellrand für den Modellantrieb gegeben ist. Es bestehen nur geringfügige Veränderungen im Vergleich zu 2014, da für die Unterweser eine Mindesttiefe vorgegeben und sie seitlich stabilisiert ist. Morphologische Veränderungen in der Außenweser finden keine Berücksichtigung. Die beobachtete

Zusammensetzung des Sediments an der Sohle ist durch die sieben oben beschriebenen Sedimentfraktionen repräsentiert.

Die Untersuchung ist als Prozessstudie aufgebaut, wobei jedoch ein realistischer Antrieb verwendet wird. Die Berechnung der Windschubspannung an der Oberfläche erfolgte anhand von Daten des operationellen Wettervorhersagemodells des Deutschen Wetterdienstes (DWD) (COSMO/LM, z. B. DOMS et al. 2002). Für den seeseitigen Rand werden die Wasserstandsdaten einer 2002 von der BAW durchgeführten Messkampagne verwendet. Der Oberwasserabfluss wurde durch Einbeziehung der täglichen Mittel der Messungen an der Station Intschede etwa 30,5 km stromauf der künstlichen Tidegrenze berücksichtigt (Bereitstellung der Daten durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes). Das Modell berücksichtigt den Salztransport, nicht jedoch den Wärmetransport. Eine Modellvalidierung wurde erfolgreich durchgeführt (BAW 2009). Die den Wasserspiegel repräsentierenden Werte entsprechen nahezu den Beobachtungsdaten: der mittlere Fehler der Wasserstandsamplitude und -phase an den einzelnen Pegeln im Weserästuar liegt zwischen -15 cm und +12 cm beziehungsweise -23 Minuten und +5 Minuten.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

Die Schwebstoffdynamik innerhalb des Spring-Nipp-Zyklus sowie auf intratidalen und saisonalen (Veränderungen des Oberwasserabflusses) Zeitskalen auf Basis jüngster Messungen und die Ergebnisse numerischer Simulationen werden im Folgenden vorgestellt und mit veröffentlichten Ergebnissen verglichen.

### 4.1 Variabilität im Tidezyklus

Auf der kürzesten hier betrachteten Zeitskala wird suspendiertes Sediment innerhalb eines Tidezyklus transportiert. Auf dieser Zeitskala sind die Ursachen für die starke SPM-Variabilität die Deposition von Material bei Kenterung, die nachfolgende Resuspension von Material aus lokalen, räumlich begrenzten Sedimentdepots während der folgenden Ebbe oder Flut sowie der anschließende Transport durch die Tideströmungen. Diese periodische Deposition von Schwebstoff wurde bei RIETHMÜLLER et al. (1988) für niedrigen Oberwasserabfluss in einem spezifischen Gebiet des Weserästuars umfassend dargestellt. GRABEMANN und KRAUSE (1989) stellten fest, dass dieses zyklische Muster auch für andere Oberwasserabflussbedingungen typisch ist. Es wird auch in den numerischen Simulationen reproduziert und ist in Abb. 3 für zwei Tidezyklen dargestellt. Bei einem vorgegebenen Oberwasserabfluss von etwa  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  befindet sich die Trübungszone in der Simulation in dem Bereich um Km 64.

Die Simulationen bestätigen, dass das Gebiet mit erhöhten Schwebstoffkonzentrationen sich analog zum Bereich niedriger Salinität der Brackwasserzone bewegt (Abb. 3). Hohe Konzentrationen suspendierten Sediments liegen häufig zwischen den 2- und 10-PSU-Isosalinen. Eine solche Kopplung von Brackwasserzone und Trübungszone ist mit bereits früher beschriebenen konzeptionellen Mechanismen zur Erklärung der Bildung der Trübungszone vereinbar. Die relative Bedeutung der verschiedenen Mechanismen wurde von BURCHARD und BAUMERT (1998) für ein schematisches Ästuar in einer numerischen Prozessstudie untersucht. Es zeigte sich, dass die ästuarine Zirkulation



(Gravitationszirkulation) und „Tidal Pumping“ die wichtigsten Vorgänge bei der Entstehung der Trübungszone sind. Auch andere barokline Prozesse spielen eine bedeutende Rolle. Bei Ebbe liegt eine Süßwasserschicht über dem Meerwasser mit höherem Salzgehalt - die vertikale Vermischung wird dadurch unterdrückt. Bei Flut hingegen wird die Wassersäule destabilisiert, was zu einer stärkeren vertikalen Vermischung führt (z. B. LANG et al. 1989). Dieser in der Literatur als „Strain Induced Periodic Stratification (SIPS)“ bezeichnete Vorgang geht auf SIMPSON et al. (1990) zurück. Veränderungen der Vermischungseffizienz („tidebedingte Vermischungssymmetrie“) während Schichtungsphasen können einen effizienteren Aufwärtstransport in der Wassersäule bewirken, während der Abwärtstransport infolge der durch die haline Schichtung gedämpften Turbulenz weniger effizient ist (JAY und MUSIAK 1994).

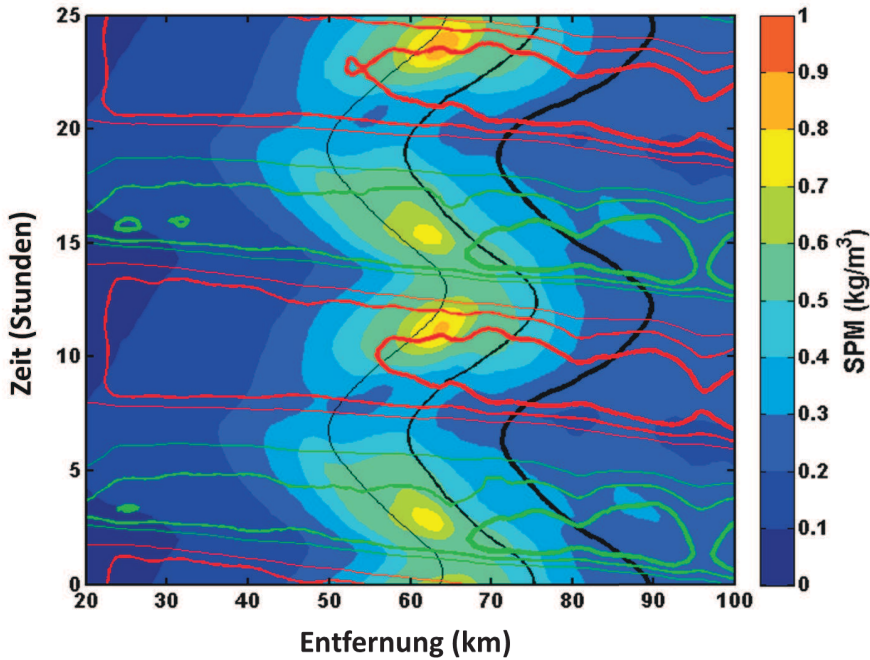


Abbildung 3: Räumliche und zeitliche Verteilung der SPM-Konzentration (Farbskala), des Salzgehalts und der Strömungsgeschwindigkeiten (Isolinien) gemäß Modellergebnissen. Salzgehalte von 2, 10 und 20 werden als schwarze Isolinien dargestellt, wobei höhere Salzgehalte durch stärkere Linien repräsentiert sind. Die Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten werden als grüne beziehungsweise rote Isolinien dargestellt. Je größer die Strömungsgeschwindigkeit, desto stärker die Linie (0,5 m/s bzw. 0,75 m/s bzw. 1,0 m/s).

Die Simulationsergebnisse zeigen in Übereinstimmung mit gemessenen Werten Schwebstoffkonzentrationen von über  $800 \text{ g/m}^3$  (z. B. Abb. 2). Bei Kenterung geht die Konzentration des suspendierten Sediments zurück und der Schwebstoff lagert sich am Boden ab, um bei Einsetzen der nachfolgenden höheren Strömungsgeschwindigkeiten wieder aufgewirbelt und stromaufwärts oder -abwärts transportiert zu werden. Die Gesamtmenge des suspendierten Materials an einer Stelle setzt sich aus durch Advektion von entfernten Quellen herangeführtem und lokal erodiertem Material zusammen. Eine ausführliche

Diskussion findet sich bei GRABEMANN und KRAUSE (1989) auf Basis von Messungen, sowie bei LANG et al. (1989), die sich auf Modellergebnisse stützen.

Bei mittleren Abflussbedingungen ist in der Trübungszone der Weser sowohl in den Messwerten als auch in den Modellergebnissen eine Ebbstromdominanz zu erkennen (Abb. 4). Die Spitzengeschwindigkeiten sind bei Ebbe durchgängig höher als bei Flut. An der Messstation Nordenham (Abb. 4, oberes Diagramm) ist eine relativ gute Übereinstimmung zwischen Modellwerten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten zu erkennen; an der Station Rechtenfleth (Abb. 4, unteres Diagramm) sind die modellierten Strömungsgeschwindigkeiten konsistent höher, die Struktur bei Ebbe und Flut ist jedoch vergleichbar.

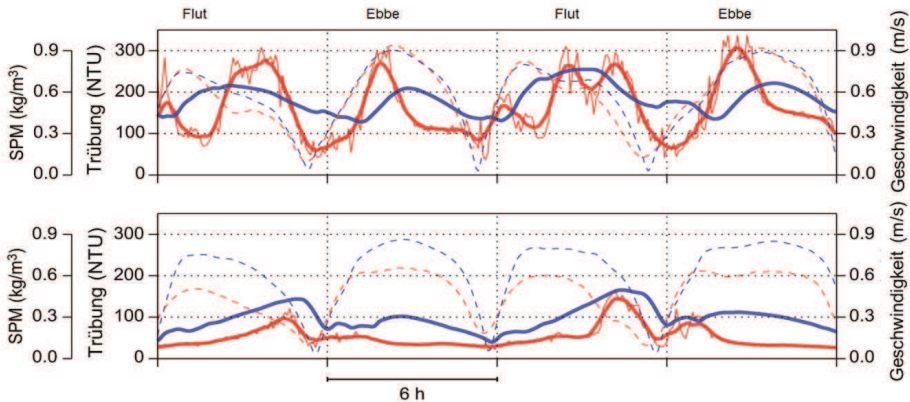


Abbildung 4: Zeitreihen der modellierten SPM-Konzentration in Bodennähe (durchgezogene blaue Linie), der modellierten Strömungsgeschwindigkeit (gestrichelte blaue Linie), der gemessenen Geschwindigkeit (gestrichelte rote Linie) und der gemessenen Trübung (rot) an den Stationen Nordenham (Km 55,8, oberes Diagramm) und Rechtenfleth (Km 46,5, unteres Diagramm). Die dünnen und dicken roten Linien zeigen die gemessene Trübung mit bzw. ohne kleinskalige Variabilität.

Abhängig von der Position des Beobachtungspunktes in Relation zur Trübungszone führt dies zu unterschiedlichen charakteristischen Mustern in den Zeitreihen der Sedimentkonzentration, wie in Abb. 4 gezeigt. Unter mittleren Abflussbedingungen befindet sich die Messstation Nordenham nahe des Zentrums der Trübungszone (oberes Diagramm), während Rechtenfleth in Nähe ihrer landseitigen Grenze liegt (unteres Diagramm). Im Zentrum der Trübungszone (Abb. 4, oberes Diagramm) erhöht sich die Schwebstoffkonzentration in Phase mit der Strömungsgeschwindigkeit. Das Signal während der Flutphase weist eine charakteristische bimodale Form auf, insbesondere bei den Messungen. Der erste Peak lässt sich wahrscheinlich mit der Erosion lokaler Sedimentquellen erklären, der zweite Peak mit durch Advektion zugeführtem Material, das weiter stromabwärts resuspendiert wurde. Während der Ebbe wird Material mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit resuspendiert und stromab transportiert. An der Position weiter stromauf (Abb. 4, unteres Diagramm) kommt der Konzentrationspeak später innerhalb der Flutphase vor, wahrscheinlich aufgrund der Advektion von Schwebstoff aus weiter stromabwärts gelegenen Quellen. Innerhalb der Ebbe kommt dieser früher vor, was wahrscheinlich lokale Erosion von Sediment und den anschließenden Transport stromabwärts repräsentiert. Dies stimmt mit dem oben beschriebenen Muster zyklischer Deposition und Erosion überein. Eine tägliche Ungleichheit ist vorhanden, diese ist jedoch im Allgemeinen nicht sehr ausgeprägt.

Die Ergebnisse aus Simulationen und Messungen können sich zwar im Detail unterscheiden, doch sind sie bei der Beschreibung der Charakteristika im Tidezyklus konsistent. Hohe Schwebstoffwerte bei Flut und bei Ebbe sind vergleichbar, obgleich das Vorkommen hoher Werte bei Flut länger andauert. Dies geht sowohl aus den Messungen als auch aus den Simulationen hervor. Da bei Flut höhere Sedimentkonzentrationen über einen längeren Zeitraum transportiert werden als bei Ebbe, ist mit einem Restschwebstofftransport stromauf zu rechnen.

Während der Vergleich der modellierten und gemessenen Schwebstoffkonzentration und Trübung eine ähnliche allgemeine Struktur zeigt, wird die auf kürzeren Zeitskalen auftretende Variabilität im Modell unterschätzt. In der Natur setzen sich Sedimente in der Wassersäule schnell ab, beispielsweise durch Flokkulation, die Resuspension dieser Flocken kann zu der beobachteten hohen Variabilität des Schwebstoffverhaltens führen. Im Modell werden die Auswirkungen der Flokkulation und das Aufbrechen der Flocken teilweise berücksichtigt, indem die Sinkgeschwindigkeit der Teilchen in Beziehung zur Konzentration und Sohlschubspannung gesetzt wird (s. MALCHEREK (1995)). Trotzdem konnte die beobachtete Variabilität der Schwebstoffkonzentration nicht vollständig erreicht werden.

## 4.2 Variabilität im Spring-Nipp-Zyklus

Die tidebedingten Schwankungen im Weserästuar werden durch die halbtägliche Ungleichheit (Partialtiden  $M_2$ ,  $S_2$ ) dominiert. An der Pegelmessstation „Alte Weser“ (Km 115) beläuft sich der mittlere Tidehub beispielsweise auf 2,9 m mit einer ausgeprägten Differenz zwischen Springtide und Nipptide (etwa 70 cm). Die Variabilität des Tidehubs innerhalb eines Spring-Nipp-Zyklus wirkt sich auf die Strömungsgeschwindigkeit und somit die Sohlschubspannung aus. So sind bei Springtiden höhere Sohlschubspannungen zu erwarten, die dann zu höheren Schwebstoffkonzentrationen führen (z. B. LANG et al. (1989)).

Als Beispiel für den Einfluss eines größeren Tidehubs werden zwei unterschiedliche Zeitspannen innerhalb der Simulationen verglichen (Abb. 5). Die Modellergebnisse werden räumlich über die Breite des Fahrwassers gemittelt, um kleinskalige Effekte zu minimieren. Zwischen den beiden Zeitspannen beträgt der Unterschied im Tidehub etwa 40 cm, was ungefähr der Hälfte der maximalen Differenz zwischen Springtide und Nipptide an der Messstation „Alte Weser“ entspricht. Das Mittelwasser ist ebenfalls erhöht (um etwa 20 cm).

Die Zunahme des Tidehubs (+11 %, über Km 20-100 gemittelt) führt zu erhöhten mittleren Strömungsgeschwindigkeiten, wobei in diesem Fall die Flutstromgeschwindigkeiten stärker betroffen sind (+13 %) als die Ebbstromgeschwindigkeiten (+7 %). Aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeiten nehmen die mittleren Konzentrationen suspendierten Sediments um etwa 20 % zu, sodass sich die Zone mit höheren Schwebstoffkonzentrationen weiter stromaufwärts und stromabwärts ausdehnt. Wird berücksichtigt, dass die Spring-Nipp-Variabilität des Tidehubs bei der Station „Alte Weser“ an der Mündung des Ästuars bis zu 70 cm betragen kann, ist eine Variabilität der Schwebstoffkonzentration von über 20 % zu erwarten.

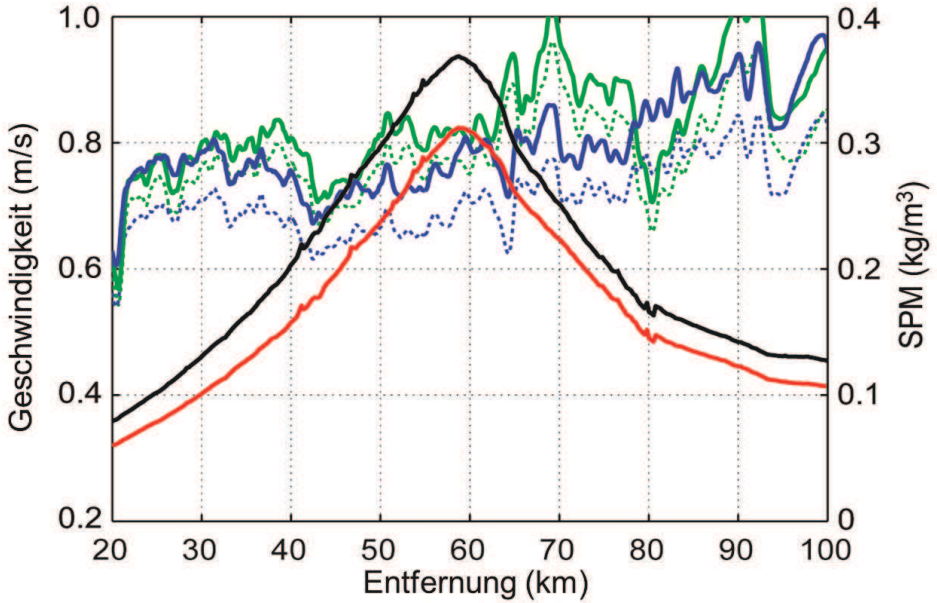


Abbildung 5: Längsprofil der mittleren SPM-Konzentrationen bei hohem (schwarze Linie) und niedrigem (rote Linie) Tidehub, der Flutstromgeschwindigkeiten bei hohem (durchgezogene blaue Linie) und niedrigem Tidehub (gestrichelte blaue Linie) sowie der Ebbstromgeschwindigkeiten bei hohem (durchgezogene grüne Linie) und niedrigem Tidehub (gestrichelte grüne Linie). Die Strömungsgeschwindigkeiten sind über die Ebbe bzw. Flut gemittelt.

Diese Vermutung wird durch Zeitreihenmessungen beispielsweise an einer spezifischen Stelle im oberstromigen Teil der Trübungszone bestätigt (Abb. 6). In den Simulationen sind die tidegemittelten Konzentrationen des suspendierten Sediments für die gemittelten Zeitspannen in Abb. 6 bei einer Springtide um etwa 50 % höher als bei einer Nipptide. Auch die tidegemittelte gemessene Trübung ist bei Springtiden höher (um etwa 35 %). Intratidal überschreiten die höchsten Schwebstoffkonzentrationen (Trübungen) bei Springtiden die bei Nipptiden verzeichneten Werte um etwa zwei Größenordnungen. Hier besteht eine Übereinstimmung mit den von GRABEMANN und KRAUSE (2001) vorgestellten Ergebnissen.

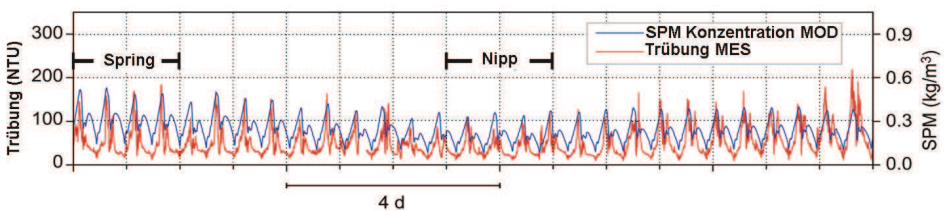


Abbildung 6: Zeitreihen der bodennahen Trübungsmessungen (MES, rot) und der modellierten SPM-Konzentration (MOD, blau) an der Messstation Rechtenfleth (Km 46,5). Die gemittelten Zeitspannen für Springtide- und Nipptidephasen sind durch die Balken dargestellt.

Insgesamt bestehen signifikante Unterschiede zwischen Springtiden und Nipptiden im Weserästuar. Sowohl durch unterschiedliche Flutstrom- und Ebbstromgeschwindigkeiten als auch unterschiedliche Flut- zu Ebbstromverhältnisse sind Änderungen der Sedimentdynamik möglich. Bei der Planung oder Interpretation von Messungen oder dem Versuch, auf Grundlage nur weniger Gezeiten repräsentative Modellergebnisse zu gewinnen, ist dies zu berücksichtigen.

### 4.3 Variabilität in Abhängigkeit vom Oberwasserabfluss

Auf längeren Zeitskalen nimmt die Umverteilung von Sedimenten im System an Bedeutung zu. Die Sedimentzusammensetzung an einem Ort kann sich durch natürliche Prozesse ändern, zum Beispiel aufgrund eines tide-induzierten Restschwebstofftransports stromaufwärts oder weil feines Material bei Flutereignissen aus dem Ästuar gespült wird. Auch anthropogene Einflüsse wie Unterhaltungsbaggerungen und Umlagerungen von Sedimenten aus der Hauptfahrinne spielen eine Rolle. Der Zusammenhang zwischen dem Oberwasserabfluss und Veränderungen der Lage der Trübungszone wird aus Abb. 7 ersichtlich.

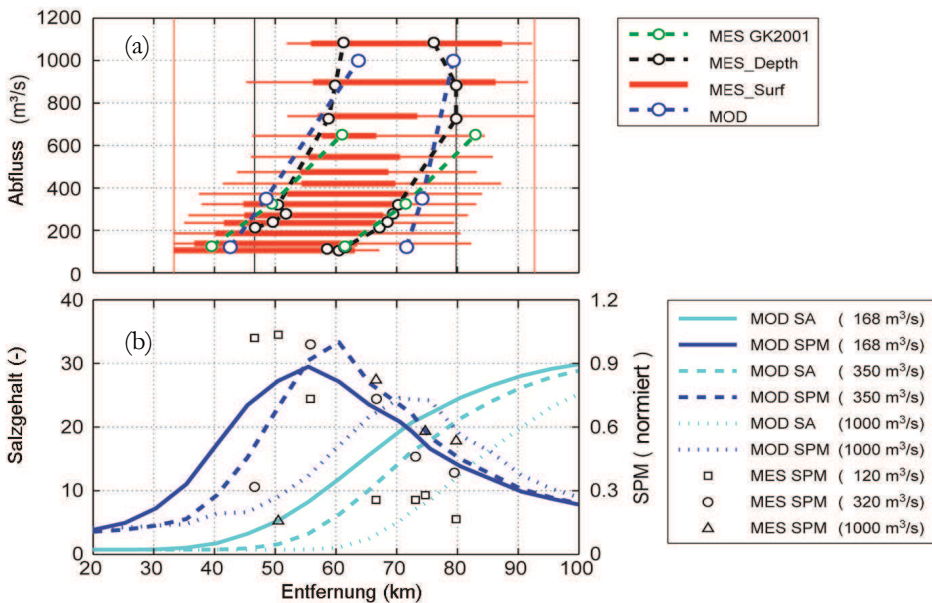


Abbildung 7: (a) Lage der Trübungszone bei unterschiedlichen Oberwasserabflussbedingungen auf Basis von Trübungsmessungen (MES GK2001: Ergebnisse von GRABEMANN und KRAUSE (2001), MES\_Depth: auf Basis von bodennahen Daten (siehe Kap. 3.1), MES\_Surf: auf Basis von langfristigen oberflächennahen Messungen (s. Kap. 3.1) und Modellergebnissen (MOD). Auch wenn die Fehlerbalken nur für MES\_Surf auf Basis der 5 %- und 95 %-Perzentile der gemessenen Trübung dargestellt sind, sind auch die anderen Messungen und Modellergebnisse mit ähnlichen Unsicherheiten behaftet. Die roten und schwarzen vertikalen Linien zeigen die oberstromigen und unterstromigen Grenzen der oberflächennahen bzw. bodennahen Messungen. (b) Längsprofile für Salzgehalt und Schwebstoffkonzentration (jeweils tidegemittelt) abgeleitet aus Modellergebnissen (MOD, Linien) und Messungen (MES, Symbole). Die vertikale Achse für suspendiertes Sediment wurde mit mittleren Oberwasserabflussbedingungen normalisiert.

Bei steigendem Oberwasserabfluss verlagert sich die Trübungszone stromabwärts. Bei niedrigen Abflussbedingungen liegt die Trübungszone etwa zwischen Km 40 und Km 60, bei hohen Abflüssen ist sie um mehr als 20 km weiter stromabwärts verschoben. Die Verschiebung der Trübungszone deckt sich annähernd mit der Verlagerung der landseitigen Grenze der Brackwasserzone. Auch die oben gezeigte enge Kopplung zwischen Brackwasserzone und Trübungszone (Abb. 3) ist hier zu erkennen (Abb. 7b). Die Auswirkungen von Oberwasserabflussschwankungen sind abhängig von den hydrologischen Bedingungen: bei einem niedrigen Oberwasserabfluss ist der Effekt einer Abflussänderung stärker als bei hohen Abflüssen. Die Sensitivität des Systems gegenüber Abflussschwankungen ist also in Zeiten niedriger Abflüsse größer, was ein nichtlineares Verhalten bei der Verschiebung der Trübungszone erkennen lässt.

Die abflussabhängige Lage der Trübungszone in Bodennähe (MES\_Depth) bestätigt grundsätzlich die vorhergehenden Ergebnisse von GRABEMANN und KRAUSE (2001), die Veränderungen der Lage der Trübungszone und ihrer Längsausdehnung bei wechselnden Oberwasserabflussbedingungen untersucht haben (Abb. 7a). MES\_Depth deutet auf eine geringfügig schwächere Sensitivität der Trübungszone gegenüber hohen Abflüssen hin. Die aus den oberflächennahen langfristigen Trübungsmessungen abgeleiteten Positionen der Trübungszone (MES\_Surf), die ein breiteres Spektrum von Abflussbedingungen beinhalten, sind generell mit den Positionen in Bodennähe vergleichbar, doch scheinen sie etwas weiter stromaufwärts ausgedehnt zu sein. Die jeweilige aus Messungen ermittelte Lage der Trübungszone ist wahrscheinlich durch die vertikale Schwebstoffverteilung in der Trübungszone beeinflusst. Das Gebiet mit der höchsten bodennahen Schwebstoffkonzentration (Trübung) im Längsschnitt weist nicht notwendigerweise auch die höchste Konzentration in Oberflächennähe auf (siehe zum Beispiel Abb. 2). Da die oberflächennahen und bodennahen Messungen nicht dieselbe Zeitspanne und damit unterschiedliche Antriebsbedingungen (z. B. meteorologische Bedingungen, Oberwasserabflüsse) abdecken, kann ein direkter Vergleich der aus unterschiedlichen Datensätzen gewonnenen Positionen der Trübungszone zusätzlich erschwert sein.

Um einen Vergleich der Messungen mit den Modellergebnissen zu ermöglichen, wurde die Lage der Trübungszone auf Basis der modellierten SPM-Konzentrationen bestimmt (Abb. 7b). Dabei wurde für die Schwebstoffkonzentrationen ein Schwellwert von 0,6 vorgegeben. Die numerische Modellierung liefert in Bezug auf die Lage der Trübungszone ähnliche Ergebnisse wie die Messungen (MES und MOD in Abb. 7a). Bei niedrigen und hohen Oberwasserabflüssen befindet sich die landseitige Grenze der Trübungszone an etwa derselben Position entlang der Flussachse. Die nichtlineare Reaktion der Verlagerung der Trübungszone auf Veränderungen der Abflussbedingungen ist im Modell weniger ausgeprägt. Der seeseitige Rand der Trübungszone liegt bei niedrigen Oberwasserabflüssen im Modell weiter stromabwärts.

Für die Schwebstoffkonzentration in der Trübungszone ist nur ein sehr allgemeiner Vergleich zwischen der tatsächlich modellierten Konzentration (gemittelt über die Breite der Fahrrinne) und der repräsentativ für die Schwebstoffkonzentration gemessenen Trübung (Tiefenmittelung an einer Stelle) möglich (Abb. 7b). Selbst wenn die Lage der Trübungszone und die Konzentration suspendierten Sediments in den Simulationen und Messungen ähnlich sind, unterscheiden sie sich doch im Detail.

Im Modell werden nur die vorgegebenen quasi-stationären Abflussbedingungen berücksichtigt, während die Übergänge zwischen unterschiedlichen Abflussbedingungen



vernachlässigt werden. Die in Abb. 7b gezeigten Messdaten wurden für bestimmte Abflussklassen analysiert. In den Messungen beinhalten diese Klassen die Übergänge zwischen verschiedenen Abfluss- und Umweltbedingungen. Die Auslegung der Daten unterliegt folglich Beschränkungen. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass zu über 75 % der Zeit ein Oberwasserabfluss zwischen  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  verzeichnet wird, kann für die Trübungszone die Lage zwischen Km 45 und Km 70 als häufigster Wert angenommen werden. Diese häufigste Lage befindet sich damit im Bereich schluffiger Sedimente der Weser („Schlickstrecke“) zwischen Km 55 und Km 66.

Die Messungen weisen darauf hin, dass fluviale Hochwasserereignisse eine länger anhaltende Wirkung haben könnten (GRABEMANN und KRAUSE 2001). So sind die Schwebstoffkonzentrationen in der Trübungszone nach solchen Hochwasserereignissen ( $> 1100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) in einigen Fällen niedriger und steigen dann im Laufe der folgenden Monate an, was auf Veränderungen der lokalen Sedimentquellen hinweist. Nicht berücksichtigt sind hier beobachtete Auswirkungen hoher Oberwasserabflüsse in Form von Veränderungen des Sedimentinventars an der Sohle, beispielsweise Veränderungen des Anteils von Feinsedimenten. Solche Auswirkungen sollten jedoch Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

## 5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Auf der Grundlage von Modellergebnissen und Messungen wurde die Variabilität der Trübungszone innerhalb des Spring-Nipp-Zyklus sowie auf intratidalen und saisonalen (Veränderungen des Oberwasserabflusses) Zeitskalen gezeigt. Der von GRABEMANN und KRAUSE (1989) und LANG et al. (1989) vorgelegte Ansatz, nach dem der Schwebstofftransport innerhalb der Trübungszone als zyklischer Prozess beschrieben wird, wurde bestätigt. Die Bewegung der Trübungszone innerhalb eines Tidezyklus scheint bei gegebenen Oberwasserabflussbedingungen eng an die Bewegung der Brackwasserzone gekoppelt zu sein. Auf einer zweiwöchentlichen Zeitskala ist eine ausgeprägte Variabilität der Schwebstoffkonzentration über den Spring-Nipp-Zyklus zu erkennen, welche die Schwebstoffkonzentrationen moduliert. Der Anstieg der Schwebstoffkonzentration erfolgt nahezu einheitlich über die Trübungszone, die daher als weiter stromaufwärts und stromabwärts ausdehnt betrachtet werden kann. Auf saisonalen Zeitskalen wird die Trübungszone stark durch Veränderungen des Oberwasserabflusses beeinflusst: dieser bewirkt eine von den Abflussbedingungen abhängige Verschiebung der Trübungszone zusammen mit der landseitigen Grenze der Brackwasserzone entlang des Ästuars.

Eine Bestimmung der Lage der Trübungszone auf Basis von Trübungsmessungen scheint verlässlich zu sein. Dennoch bestehen nach wie vor einige Unsicherheiten bei Rückschlüssen von Trübungswerten auf Sedimentkonzentrationen. Die Korrelation der Trübungsmesswerte mit den Schwebstoffwerten ist nicht, wie hier angenommen, über die Zeit konstant, sondern kann etwa aufgrund biologischer Einflüsse (z. B. Phytoplankton) variieren. Darüber hinaus wird angenommen, dass die für die zwei bis drei Proben in einem bestimmten Querschnitt gemessenen Werte gemittelt werden können, um eine repräsentative Schwebstoffkonzentration für den betreffenden Querschnitt zu erhalten. Die vom numerischen Modell gelieferten Informationen über die Sedimentverteilung sind vollständiger, unterliegen jedoch dem Einfluss der gewählten Modellparameter, wie zum

Beispiel den modellierten Sedimentfraktionen und den vorgegebenen Sinkgeschwindigkeiten.

Trotz der Unsicherheiten deutet die Ähnlichkeit zwischen Modell und Messungen auf den hier betrachteten unterschiedlichen Zeitskalen auf die Belastbarkeit der gewählten Ansätze hin. Wir sind daher zuversichtlich, dass das numerische Modell in Zukunft ermöglicht wird, durch detailgenauere Simulationen relevante Prozesse weiter zu identifizieren. Die vorliegende Studie konzentrierte sich auf ausgewählte quasi-stationäre Oberwasserabflussbedingungen; der Übergang zwischen verschiedenen Zuständen muss daher Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Zwei praktische Aspekte dieser Studie sollten kurz erwähnt werden. Erstens, obgleich sich langfristige Messungen an den Pegeln als geeignetes Mittel zur Bestimmung der Lage der Trübungszone erwiesen haben, sind sie mit starken Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten sind auf die große natürliche Variabilität, die Grenzen der Analysemethode und die Einschränkungen bei den Daten (z. B. geräteabhängige Messgenauigkeit) zurückzuführen. Gegenwärtig sind permanente Trübungsmessungen aufgrund der Anforderungen an die Leichtigkeit und Sicherheit des Schiffsverkehrs in den Bundeswasserstraßen nur am Fahrrinnenrand möglich. Diese Einschränkung lässt sich möglicherweise in Zukunft mit dem Einsatz eines Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler (H-ADCP) durch das WSA Bremerhaven umgehen. Zweitens, auch wenn die Lage der Trübungszone auf jeder der hier betrachteten Zeitskalen stark variiert, besteht doch eine gewisse Vorhersagbarkeit. Dies kann sich für eine bessere Beschreibung der Schwebstoffdynamik in der Trübungszone als nützlich erweisen und so zur Optimierung des Sedimentmanagements im Weserästuar beitragen.

## 6 Danksagung

Die Autoren danken der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSA Bremerhaven) für die Bereitstellung der Messdaten zur Hydrodynamik und Trübung. Wir danken B. Gardeike und W. Appel für die Unterstützung bei den grafischen Darstellungen.

## 7 Schriftenverzeichnis

- AQUA VISION BV: Suspended sediment measurements in the Weser, June 2009. Technical report. Aqua Vision BV, 2009.
- BAW: Modellvalidierung UnTrim / SediMorph - Hydrodynamik und Schwebstofftransports des Jade – Weser – Ästuars. Bundesanstalt für Wasserbau, 93 S., 2009. [http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische\\_verfahren/Validierungsstudien/Modellvalidierung\\_Weser-GM\\_UnTRIM2007\\_v1.3.pdf](http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/Validierungsstudien/Modellvalidierung_Weser-GM_UnTRIM2007_v1.3.pdf)
- BAW: Mathematical module SediMorph – Validation document, Bundesanstalt für Wasserbau, 77 S., 2005. [http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische\\_verfahren/pdf/vd-sedimorph.pdf](http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/vd-sedimorph.pdf)
- BURCHARD, H. and BAUMERT, H.: The Formation of Estuarine Turbidity Maxima Due to Density Effects in the Salt Wedge. A Hydrodynamic Process Study. In: Journal of Physical Oceanography, Vol. 28, 309-321, 1998.



- CASULLI, V. and ZANOLLI, P.: High resolution methods for multidimensional advection–diffusion problems in free-surface hydrodynamics. In: *Ocean Modelling*, Vol. 10, 1-2, 137-151, doi: 10.1016/j.ocemod.2004.06.007, 2005.
- DE NIJS, M. A. J.; WINTERWERP, J. C. and PIETRZAK, J. D.: On harbour siltation in the fresh-salt water mixing region. In: *Continental Shelf Research*, Vol. 29, 1, 175-193, doi: 10.1016/j.csr.2008.01.019, 2009.
- DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH: Weser und Emsgebiet 2010. 1.11.2009 - 31.12.2010. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, 301 p., 2013.
- DIECKMANN, R.: Morphologische Strukturen im Weserästuars. In: *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, Vol. 33, 3/4, 104-112, 1989.
- DOMS, G.; STEPPELER, J. und ADRIAN, G.: Das Lokal-Modell LM. In: *promet*, Vol. 27, 3/4, 123-128, 2002.
- DYER, K. R.: *Estuaries: a physical introduction*. John Wiley and Sons, 1997.
- FESTA, J. F. and HANSEN, D. V.: Turbidity maxima in partially mixed estuaries: A two-dimensional numerical model. In: *Estuarine and Coastal Marine Science*, Vol. 7, 4, 347-359, doi: 10.1016/0302-3524(78)90087-7, 1978.
- GRABEMANN, I. and KRAUSE, G.: Transport processes of suspended matter derived from time series in a tidal estuary. In: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, C10, 14373, doi: 10.1029/JC094iC10p14373, 1989.
- GRABEMANN, I. and KRAUSE, G.: On Different Time Scales of Suspended Matter Dynamics in the Weser Estuary. In: *Estuaries*, Vol. 24, 5, 688, doi: 10.2307/1352877, 2001.
- HOLZWARTH, I.; SCHULTE-RENTROP, A. und HESSER, F.: Auswirkungen klimabedingter Änderungen auf das Strömungs- und Transportverhalten deutscher Nordseeästuare. In: HAFENTECHNISCHE GESELLSCHAFT E.V. Ed.: *Vorträge HTG-Kongress 2011*. Würzburg, 275-282, 2011.
- IRION, G.; WUNDERLICH, F. and SCHWEDHELM, E.: Transport of clay minerals and anthropogenic compounds into the German Bight and the provenance of fine-grained sediments SE of Helgoland. In: *Journal of the Geological Society*, Vol. 144, 153-160, 1987.
- JAY, D. A. and MUSIAK, J. D.: Particle trapping in estuarine tidal flows. In: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, C10, 20445, doi: 10.1029/94JC00971, 1994.
- LANG, G.: *Zur Schwebstoffdynamik von Trübungszonen in Ästuarien*. Universität Hannover, Hannover, Institut für Strömungsmechanik und Elektron. Rechnen im Bauwesen, 113 S., 1990.
- LANG, G.; SCHUBERT, R.; MARKOFSKY, M.; FANGER, H.-U.; GRABEMANN, I.; KRASEMANN, H. L.; NEUMANN, L. J. R. and RIETHMÜLLER, R.: Data interpretation and numerical modeling of the Mud and Suspended Sediment Experiment 1985. In: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, C10, 14381, doi: 10.1029/JC094iC10p14381, 1989.
- LANGE, D.; MÜLLER, H.; PIECHOTTA, F. and SCHUBERT, R.: The Weser Estuary. In: KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN Ed.: *Die Küste. Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee*. Heide i. Holstein, 275-287, 2008.

- MALCHEREK, A.: Mathematische Modellierung von Strömungen und Stofftransporten in Ästuaren. PhD thesis. Universität Hannover, Hannover, Institut für Strömungsmechanik und Elektron. Rechnen im Bauwesen, 203 S., 1995.
- OFFICER, C. B.: Physical dynamics of estuarine suspended sediments. In: *Marine Geology*, Vol. 40, 1-2, 1-14, doi: 10.1016/0025-3227(81)90039-6, 1981.
- RIETHMÜLLER, R.; FANGER, H.-U.; GRABEMANN, I.; KRASEMANN, H. L.; OHM, K.; BÖNING, J.; NEUMANN, L. J. R.; LANG, G.; MARKOFESKY, M. and SCHUBERT, R.: Hydrographic Measurements in the Turbidity Zone of the Weser Estuary. In: DRONKERS, J. and LEUSSEN, W. Eds.: *Physical Processes in Estuaries*. Berlin, Heidelberg, 332-344, doi: 10.1007/978-3-642-73691-9\_18, 1988.
- SCHROTTKE, K.; BECKER, M.; BARTHOLOMÄ, A.; FLEMMING, B. W. and HEBBELN, D.: Fluid mud dynamics in the Weser estuary turbidity zone tracked by high-resolution side-scan sonar and parametric sub-bottom profiler. In: *Geo-Marine Letters*, Vol. 26, 3, 185-198, doi: 10.1007/s00367-006-0027-1, 2006.
- SEIFFERT, R.; HESSER, F. B.; SCHULTE-RENTROP, A. and SEIB, G.: Potential effects of climate change on the brackish water zone in German estuaries. In: HINKELMANN, R.-P.; LIONG, Y.; SAVIC, D.; NASERMOADDELI, M. H.; DAEMRICH, K.-F.; FRÖHLE, P. and JACOB, D. Eds.: *Understanding Changing Climate and Environment and Finding Solutions*. Hamburg, 2012.
- SIMPSON, J. H.; BROWN, J.; MATTHEWS, J. and ALLEN, G.: Tidal Straining, Density Currents, and Stirring in the Control of Estuarine Stratification. In: *Estuaries*, Vol. 13, 2, 125, doi: 10.2307/1351581, 1990.
- TALKE, S. A.; SWART, H. E. DE and SCHUTTELAARS, H. M.: Feedback between residual circulations and sediment distribution in highly turbid estuaries: An analytical model. In: *Continental Shelf Research*, Vol. 29, 1, 119-135, doi: 10.1016/j.csr.2007.09.002, 2009.
- WELLERSHAUS, S.: Die Trübungswolke im Weser-Ästuar. In: *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 26, 1982.