

Simulation hoher Schwebstoffkonzentrationen und Optionen für eine Sanierung der Unterems

Monika Donner und Oliver Stoschek

Zusammenfassung

Ästuarie mit extrem hohen Schwebstoffkonzentrationen beeinträchtigen die wasserwirtschaftlichen Nutzungen, die Schifffahrt und die Gewässerökologie. Derzeit versuchen Ökologen und Wasserwirtschaftsbehörden Lösungen für die Ems in Form verschiedener Sanierungsvarianten, die die Tidesymmetrie abmindern und die Schwebstoffkonzentration absenken, zu finden. Indikatoren, die insbesondere für die Mobilisierung, die Resuspension und das Absinken von kohäsiven Sedimenten stehen, liefern für die Einstufung der Sanierungsvarianten wichtige Bewertungsgrößen. Hierzu wurden hydro- und morphodynamische Indikatoren, wie die Veränderungen der Ebb- und Flutströmung, der Ebb- und Flutströmungsgradienten, des Nettosedimenttransports und die Verschiebung der Trübungszone bewertet. Insbesondere Indikatoren für Feinsedimente wurden gewählt, um eine mittelfristige Reduktion der Schwebstoffkonzentration zu bewerten.

Für die Prozessbeschreibung dieser Ästuarie wurden numerische Simulationen durchgeführt. Allerdings können bestehende physikalische Ansätze für kohäsive Sedimente nur bedingt angewandt werden. So wurden für die Abbildung hochkonzentrierter Schwebstofftransportprozesse zwei verschiedene Ansätze für die Ems gegenübergestellt: Ein Ansatz mit einem vereinfachten Flokkulationsterm und behindertem Absinken sowie ein neuer Flokkulationsansatz, der die Veränderung der Turbulenz und der Salinität mitberücksichtigt. Die Hydrodynamik, der Salz- und der Schwebstofftransport wurden dreidimensional mittels finiter Volumenmethode für die Außen- und Unterems aufgelöst.

Die hier durchgeführte Simulation mittelfristiger Tendenzen unterliegt bereits Unsicherheiten, so dass langfristige Tendenzen nur schwierig abzuschätzen sind. Auf Basis eines bestehenden Langzeitansatzes für tidebeeinflusste Marschgewässer mit kohäsivem Sediment werden erste Schlussfolgerungen für ein Langzeitkonzept in ästuariner Umgebung beschrieben.

Schlagwörter

Hochkonzentrierte Schwebstoffe, Sanierungsmaßnahmen, Flokkulation, Indikatoren, Langzeitverfahren

Summary

Estuaries with hyper-concentrated suspended sediment concentration (SSC) provide critical conditions for water management, channel shipping and ecological affairs. Due to the extreme situation of the Ems concerning the SSC, ecologists and water management authorities try to find solutions by different restoration measures, which aim to damp the hydrodynamic asymmetry and to reduce the suspended sediment concentration. Indicators especially for mobilization, resuspension and settling of fine cohesive sediments provide

important benchmarks to evaluate restoration potential. Therefore hydro- and morphodynamic indicators like changes in flood and ebb currents, in flood- and ebb current gradients, net sediment flux and the shift of the turbidity zone were assessed. Especially indicators for fine sediments were selected to analyze the potential of meso-scale suspended sediment reduction.

Numerical simulations were performed to increase the Understanding of this estuary. But it shows limits to the existing physical approaches for cohesive sediment transport. For a performance of high suspended sediment concentrations two approaches, one with a simplified flocculation and typical hindered settling, and one with a new flocculation approach taking turbulence and salinity into account, were compared for the Ems Estuary. The hydrodynamic processes, salinity and suspended sediment transport were resolved by a numerical three dimensional finite volume model for the Outer and Lower Ems.

Considering the uncertainties already inherent in meso-scale simulations the long-term effects are difficult to anticipate. Based on an existing long-term approach for a tidal marsh river with cohesive sediments, first conclusions for a promising long-term concept in an estuarine environment are presented.

Keywords

hyper-concentrated suspended sediments, restoration measures, flocculation, indicators, long-term

Inhalt

1	Einleitung	472
2	Methode.....	474
2.1	Numerischer Ansatz	474
2.2	Kalibrierung und Vergleich der verschiedenen Ansätze	476
2.3	Bewertung der Sanierungspotentiale.....	478
3	Ergebnisse und Diskussion	480
3.1	Hydrodynamische Wirkung.....	481
3.2	Wirkung auf den Schwebstofftransport	484
4	Schlussfolgerungen	486
4.1	Sanierungspotential.....	486
4.2	Allgemeine Schlussfolgerungen	488
5	Ausblick	488
6	Danksagung.....	489
7	Schriftenverzeichnis.....	489

1 Einleitung

Ästuarie bilden eine wichtige Verbindung zwischen marinen und fluvialen Systemen. Insbesondere das Emsästuar war aufgrund menschlicher Ansprüche von Maßnahmen wie Flussregulierungen, Vertiefungen und Verlust von Flachwasserzonen betroffen. Hauptursache für die heute hohe Schwebstoffkonzentration in der Ems sind die hydro- und morphodynamischen Veränderungen als Folge der Emsvertiefung (WEILBEER 2005).

Die hydrodynamischen Veränderungen sind auf die Absenkung des Tideniedrigwassers und die Erhöhung des Tidehochwassers zurückzuführen. So war in den letzten 70 Jahren ein Anstieg des Tidehubs in Herbrum von 1 m auf 3,5 m zu verzeichnen (JÜRGES und WINKEL 2003). Darüber hinaus führt die Asymmetrie der Tideprozesse zwischen Ebbe- und Flutphase zu einer erhöhten Flutstromdominanz mit stärkeren maximalen Strömungen, während die Ebbströmungen nahezu konstant bleiben. Der Strömungsgradient zwischen Kenterung und Flutstrom ist bis zu achtmal steiler als der Gradient zwischen Kenterung und Ebbstrom.

Das heutige Emsästuar weist eine dramatische Zunahme der Trübung im Laufe der letzten 15 Jahre auf: Im jährlichen Mittel stieg die Schwebstoffkonzentration von 1 g/l in den Jahren 1992/93 (SCHUTTELAARS et al. 2009) auf 10 g/l im Zeitraum 2008/09 (NLWKN Aurich 2009). Diese Entwicklung war begleitet von einer extremen flussaufwärtigen Verschiebung der Trübungzone (englisch: Estuarine turbidity maximum, ETM). Die Betrachtung der jährlich gemittelten Schwebstoffkonzentrationen im historischen Verlauf zeigt, dass sich in den 1950er Jahren die Trübungzone (ETM) mit einer Konzentration von etwa 0,2 g/l in Emden befand. Nach der Vertiefung der Außenems (1975-76) verlagerte sich die ETM stromauf nach Terborg und die Konzentration erhöhte sich auf 0,4 g/l. Im Jahr 2005 wurde eine ausgedehnte Trübungzone und einer Konzentration von 1 g/l im Abschnitt von Terborg bis Papenburg festgestellt. Insbesondere von der Mündung der Unterems in das sogenannte Emdener Fahrwasser werden bei niedrigen und mittleren Oberwasserabflüssen Sedimente von der Nordsee in das Emsästuar eingetragen. Zusätzlich bilden sich in Nähe der Flusssohle Flüssigschlickgeschichten aus. Im oberen Teil der Unterems sind solche Fluid Mud-Schichten über extreme Gradienten der Schwebstoffkonzentration (3 bis 7 g/l/min) erkennbar.

Ökologen und Wasserwirtschaftsbehörden arbeiten heute in gemeinschaftlichen Projekten zusammen, wie beispielsweise in dem Vorhaben „Perspektive Lebendige Unterems“, um Sanierungsmaßnahmen (Abb. 1) als Lösungsansätze für eine Reduzierung der Schwebstoffkonzentrationen und eine Verbesserung der Sauerstoffversorgung zu finden. Verschiedene Konzepte für eine Sanierung wurden von Wasserwirtschaftsbehörden, Naturschutzverbänden und internationalen Experten vorgelegt:

- Anlage von Tidepoldern (Retentionsräume): Tidepolder ermöglichen eine verzögerte Abgabe des Tidevolumens und der Sedimente sowie eine Reduzierung des Tidevolumens im Oberwasser dieser Polder.
- Entwicklung von Flachwasserzonen mit Reaktivierung von Altarmen: Bifurkationen und Flachwasserzonen in den Vorlandflächen haben aufgrund der geomorphologischen Gegebenheiten eine makroskalige Wirkung. Mit der Stromspaltung kann durch Dissipation eine Reduzierung der Strömung und somit der Dynamik erreicht werden.
- Ästuarverlängerung: Ein Rückbau des Tidewehrs in Herbrum zur Verlängerung des Emsästuars wird sich auf die Ausbreitung der Tidewelle auswirken und insbesondere ihre Reflektion verringern.
- Verflachung: Die Sohlenerhebung bedeutet eine geringere Wassertiefe in der tiefen Fahrrinne zwischen Leer und Papenburg, was infolge eines veränderten Breiten-Tiefen-Verhältnisses morphologische Auswirkungen haben wird.
- Technische Optionen mit verschiedenen Regulierungsmöglichkeiten am Sturmflutsperrwerk (WURPTS 2012).

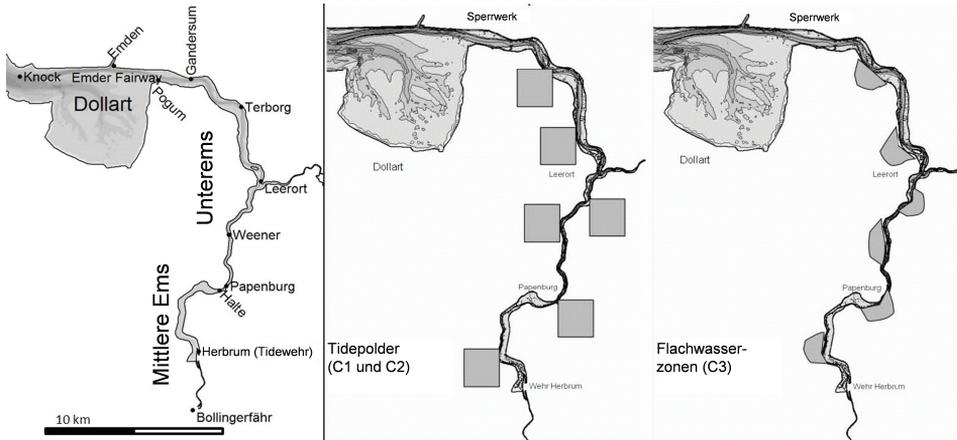


Abbildung 1: Übersicht der Untererems (links), Skizzen der Sanierungsvarianten für das Emsästuar, Tidepolder (Mitte) und Flachwasserzonen (rechts).

Dieser Beitrag konzentriert sich ausschließlich auf die Auswirkungen einer Verflachung, Ästuarverlängerung, Anlage von Tidepoldern und lateralen Retention, wobei das Hauptaugenmerk auf der Sanierung des Emsästuars liegt.

2 Methode

Um die Auswirkungen der Sanierungsvarianten zu untersuchen, wurde zunächst der aktuelle Zustand im Emsästuar bei den gegebenen hydrodynamischen Bedingungen und hohen Schwebstoffkonzentrationen in einem numerischen Verfahren dargestellt. Dabei fanden zwei unterschiedliche Ansätze für den Sedimenttransport Berücksichtigung.

2.1 Numerischer Ansatz

Die numerische Analyse basiert auf einer dreidimensionalen Auflösung der hydrodynamischen Prozesse, des Salzgehalts und des Schwebstofftransports im Emsästuar zwischen Borkum und Bollingerfähr (Abb. 1). Zu diesem Zweck wurde eine finite Volumen-Methode mit Sigmaschicht-Ansatz in einem unstrukturierten Gitter (MIKE 3 FM) angewendet. Die Lösung der hydrodynamischen Fragestellungen erfolgte auf Basis von Reynolds-gemittelten Navier Stokes-Gleichungen mit einer an den Salztransport gekoppelten Dichte. Zur Turbulenzmodellierung wurden ein k-ε-Modell in vertikaler Richtung und der Mischungsweg-Ansatz von Smagorinsky mit einem Koeffizienten von 0,28 in horizontaler Richtung angewendet. Der Fließwiderstand der Gewässersohle, die aufgrund der kohäsiven und schlickigen Sedimente nahezu keinen Widerstand aufweist, wurde auf Grundlage des Rauheitsansatzes nach Nikuradse mit einer Rauheitshöhe zwischen 0,5 und 5 mm im supratidalen Bereich mitberücksichtigt.

Für die Modellierung der Sedimentdynamik wurden zwei unterschiedliche Verfahren (Mud Transport (MT) und ECO Lab (EL)) verwendet und miteinander verglichen. Sie unterscheiden sich in erster Linie bei dem gewählten Ansatz für die Sinkgeschwindigkeiten. Für beide Verfahren erfolgt die Lösung des Schwebstofftransports mit der

dreidimensionalen Advektions-/Diffusionsgleichung unter Berücksichtigung eines behinderten Absinkens und der Eigenschaften kohäsiver Sedimente. Da die g Feinsand-, Schluff- und Tonfraktionen überwiegen, spielen die Sandfraktionen und der Geschiebetransport eine weniger bedeutende Rolle bei der Sedimentdynamik, im Hinblick auf morphologische Veränderungen (WEILBEER 2003).

Die Erosionsrate basiert auf der Formel für konsolidierte kohäsive Sedimente nach PARTHENIADES (1965):

$$S_{\text{ero}} = \beta_{\text{ero}} \left(\frac{\tau_0}{\tau_{\text{c,ero}}} - 1 \right) \quad \text{für } \tau_0 > \tau_{\text{c,ero}} \quad (1)$$

wobei β_{ero} der Erodierbarkeitsfaktor ist [$\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$], $\tau_{\text{c,ero}}$ die kritische Erosionsschubspannung [N/m^2], S_{ero} die Erosionsrate [$\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$] und τ_0 die Bodenschubspannung [N/m^2]. Für beide Methoden erfolgte eine Approximation der allgemeinen empirischen Erosions- und Depositionsparameter auf Basis empirischer Verfahren, in der Fachliteratur verwendeter Werte und der Korngrößenverteilung für die Ems, welche von der BAW und vom NLWKN zur Verfügung gestellt wurden. Die Trockenraumdichte des Sohlmaterials wurde mithilfe des empirischen Ansatzes nach Allersma (1988, in VAN RIJN 2007) geschätzt; dabei ergab sich ein Intervall von 170 bis 1290 kg/m^3 für die Trockenraumdichte. Die Begrenzung der kritischen Erosionsschubspannung erfolgte gemäß dem Ansatz von ZANKE (1982) für weichen und nicht konsolidierten Schlack (0,12 bis 0,45 N/m^2). Für die Schätzung des Erodierbarkeitsfaktors fand die Methode von SCHWEIM (2005) unter Berücksichtigung der in der Literatur variierenden Bandbreite von 0,01 bis 5 $\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$ Anwendung.

Die Depositionsrate D wird gemäß der Vorgehensweise von KRONE (1962) wie folgt beschrieben:

$$D = w_s \cdot c_b \cdot \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_{\text{c,dep}}} \right) \quad \text{für } \tau_0 \leq \tau_{\text{c,dep}} \quad (2)$$

Dabei ist w_s die Sinkgeschwindigkeit [m/s], c_b die sohlnahe Sedimentkonzentration [g/m^3], $\tau_{\text{c,dep}}$ die kritische Schubspannung für die Deposition [N/m^2], D die Depositionsrate [$\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$] und τ_0 die Bodenschubspannung [N/m^2]. Während bei PARTHENIADES (1965) die kritische Schubspannung für Depositionswerte mit 0,04 bis 0,15 N/m^2 angegeben wird, verwenden LI et al. (1994) Werte zwischen 0,3 und 0,5 N/m^2 . Für das Beispiel der Ems wurde ein konstanter Wert von 0,07 N/m^2 verwendet.

Beim MT-Verfahren beruhen die Sinkgeschwindigkeiten auf einem empirischen Flokkulationsansatz nach BURT (1986) und einem Ansatz für ein behindertes Absinken für $c > c_{\text{hinder}}$ nach WINTERWERP (1999):

$$w_s = \begin{cases} \text{konstant oder linear} & \text{für } c < c_{\text{floc}} \\ k \cdot c^\gamma & \text{für } c_{\text{floc}} \leq c \leq c_{\text{hinder}} \\ w_{s,r} \frac{(1-\Phi^*)(1-\Phi_p)}{1+2.5\Phi} \quad \text{mit } \Phi_p = \frac{c}{\rho_s}; \Phi^* = \frac{c}{c_{\text{gel}}} & \text{für } c > c_{\text{hinder}} \end{cases} \quad (3)$$

Dabei ist w_s die Sinkgeschwindigkeit [m/s], k und γ sind die Koeffizienten [-], c die Sedimentkonzentration [kg/m^3], Φ die volumetrische Sedimentkonzentration [m^3/m^3], c_{floc}

ist die Schwellwertkonzentration für die Gelbildung [kg/m^3] und ρ_s die Sedimentdichte [kg/m^3]. Im dem Alternativverfahren (EL) wurde ein von NGUYEN (2010, 2012) entwickelter neuer Flokkulationsansatz verwendet und mit der MT-Methode verglichen. Dabei erfolgt die Beschreibung und Lösung für die Hydrodynamik in derselben Weise wie oben beschrieben (MIKE 3 FM). Auch die Berechnung des Sedimenttransports (3D-Advektion-Diffusion) sowie der Erosions- und Depositionsraten erfolgt analog zu den Ansätzen von PARTHENIADES (1965) und KRONE (1962). Ein Unterschied besteht hinsichtlich der Sinkgeschwindigkeit, bei der die Flockengröße, Flockendichte und der Schleppkraftkoeffizient sowie die durch Salzgehalt und Turbulenz verursachten Effekte berücksichtigt werden. Die Berechnung der Sinkgeschwindigkeiten beruht auf dem modifizierten Gesetz von Stokes:

$$w_s = (1 - \phi) \sqrt{\frac{4 \cdot (\rho_f - \rho_m) \cdot g \cdot D_f}{3 \cdot \rho_m \cdot C_{D,mt}}} \quad (4)$$

Dabei ist w_s die Sinkgeschwindigkeit unter turbulenten Bedingungen [m/s], ϕ die volumetrische Konzentration der Flocken im Gemisch [m^3/m^3], ρ_f die Flockendichte [kg/m^3], ρ_m die Dichte des Sediment-Fluid-Gemischs [kg/m^3], g die Erdbeschleunigung [m/s^2], D_f die Flockengröße [m] und $C_{D,mt}$ der Schleppkraftkoeffizient der Flocken [-]. Die Flockengröße ist das Ergebnis von Aggregations- und Zerfallsprozessen. Ein Anstieg der Schwebstoffkonzentration führt somit zu einer höheren Wahrscheinlichkeit einer Kollision von Primärpartikeln, wodurch eine Aggregation begünstigt wird. Es wird davon ausgegangen, dass die Flockenbildung auch durch einen hohen Salzgehalt durch Kompression der elektrischen Doppelschicht um die Partikel und die damit zunehmende Wirkung der van-der-Waals-Kräfte unterstützt wird. Bei hoher Turbulenz kommt es zu einem Zerfall der Flocken. Die Flockendichte wird anschließend auf Basis der Flockengröße berechnet. Der Schleppkraftkoeffizient ist abhängig von Form und Größe der Primärpartikel oder Schwebstoffflocken sowie von der Viskosität des Sediment-Fluid-Gemischs. Die Tatsache, dass bei der Berechnung der Flockengröße und des Schleppkraftkoeffizienten die Turbulenz berücksichtigt wird, kann als besonderes Merkmal des im EL-Verfahren implementierten Ansatzes betrachtet werden.

2.2 Kalibrierung und Vergleich der verschiedenen Ansätze

Das numerische Modell wurde gegenüber bestehenden Messdaten für Wasserstand, Strömungen, Salzgehalt und Schwebstoffkonzentrationen kalibriert und validiert (Abb. 2). Zu diesem Zweck wurden drei Sommerereignisse des Jahres 2008 berücksichtigt: ein niedriger Oberwasserabfluss (ca. $40 \text{ m}^3/\text{s}$), ein mittlerer Abfluss (ca. $80 \text{ m}^3/\text{s}$) sowie ein jährlicher mittlerer Hochwasserabfluss (ca. $110 \text{ m}^3/\text{s}$). Winterereignisse und Sturmfluten sind für die hohe Trübung in der Ems nicht von Bedeutung.

Die Quantifizierung der Modelleleistung erfolgte anhand des mittleren Fehlers (englisch: mean error, ME). Für den Wasserstand und die Tidenströmungen wurde ein guter ME erreicht: weniger als $0,12 \text{ m}$ beim Wasserstand ($0,05$ bis $0,24 \text{ m}$) und etwa $0,14 \text{ m}/\text{s}$ für die Strömungen ($0,07$ bis $0,22 \text{ m}/\text{s}$). Eine Verzögerung ergibt sich in der Phase zwischen simulierter und gemessener Tidekurve. Die Amplitude des Tidehochwassers wird mit Abweichungen von unter 10 cm (mittlerer Wert) recht gut reproduziert, während die

Amplitude des Tideniedrigwassers eine geringfügige Überschätzung von bis zu etwa 20 cm aufweist. Die Tideasymmetrie auf Basis des Wasserspiegelgradienten im Laufe der Zeit wird im numerischen Modell mit einer geringfügigen Differenz zwischen simuliertem und gemessenem Gradienten (unter 0,003 m/min) sehr gut reproduziert.

Aufgrund der saisonalen Variabilität des Salzgehalts am seeseitigen Modellrand, die aus den Zeitreihen der Salzgehaltmessungen an der Messstation in Knock (Ems-km 51, Abb. 1) abgeleitet wurde, erfolgte eine Analyse der unterschiedlichen Randwerte zwischen 30 und 32 PSU bei Borkum im Rahmen einer Sensitivitätsstudie. Bei niedrigen Oberwasserabflüssen (MHQ bis 40 m³/s), welche für die hohen Schwebstoffkonzentrationen im Emsästuar relevant sind, stellte die Verwendung des Wertes von 30 PSU am seeseitigen Rand die gemessenen Salzgehaltsbedingungen zwischen Knock und Herbrum dar (Abb. 1). Dabei betrug der mittlere Fehler 3,1 und somit weniger als 0,01 PSU (Abb. 2).

Die Kalibrierung des Schwebstofftransports liefert eine gute Genauigkeit, wobei Differenzen zwischen gemessenen und modellierten Schwebstoffkonzentrationen von 0,2 bis 3,9 g/l (bei Verwendung der MT-Methode) beziehungsweise 0,3 bis 3,7 g/l (EL-Methode) bestehen. Die hohe Abweichung von mehr als 3 g/l ist bei beiden Methoden auf eine Unterschätzung der lokalen Höchstkonzentration in den Messzeitreihen zurückzuführen. Die gemessenen Schwebstoffkonzentrationen nehmen während der Kenterung vor Einsetzen der Flut von 5 g/l auf 40 g/l zu und wieder ab, wobei der Gradient im Bereich von Weener (Ems-Km 7, Abb. 1) $\pm 7,8$ g/l/min und im Bereich von Papenburg (Ems-Km 0, Abb. 1) $\pm 3,7$ g/l/min beträgt. Beide Messstellen befinden sich etwa 3 m oberhalb der Flusssohle.

Diese Höchstkonzentration ist im numerischen Modell nur näherungsweise mit einer erheblich niedrigeren Amplitude aufgelöst. Für diese vorübergehenden Höchstkonzentrationen bei minimalen Strömungsgeschwindigkeiten nahe der Kenterung kann es drei Gründe geben:

- Suspensierte Sedimente sinken während Stauwasser in der Wassersäule ab, und aufgrund eines behinderten Absinkens bildet sich eine hoch konzentrierte sohlnahe Schicht mit zunehmender Dicke.
- Bei Einlaufen des Flutstroms wird diese sohlnahe Schicht mit extrem hoher Schwebstoffkonzentration (Flüssigschlick) stromauf transportiert und es kommt zu einer Ansammlung von Fluid Mud im Abschnitt zwischen Weener und Papenburg.
- Suspensiertes Sediment in Sohlhöhe wird aufgrund des hohen Geschwindigkeitsgradienten nach Kenterung in die Wassersäule resuspendiert.

Abgesehen von den Höchstkonzentrationen im Oberwasser wird das tidebedingte Pendeln der Schwebstoffkonzentration durch das numerische Modell abgebildet (Abb. 2).

Ein Vergleich zwischen den beiden Methoden zur Bestimmung der Sinkgeschwindigkeiten ergab, dass mit der verfeinerten EL-Methode die Repräsentation geringfügig höherer Schwebstoffkonzentrationen - insbesondere bei Flutstrom - möglich ist (s. deutlicher Peak bei der Bodenschubspannung im rechten Teil von Abb. 2). Beide Methoden sind jedoch ungeeignet, um den steilen Anstieg und Rückgang der Schwebstoffkonzentration in Weener nachzubilden. Diese sind in der auf der Schubspannung basierenden Erosions- und Depositionsrate begründet, die für beide Methoden verwendet wird. Ausgehend von diesem Ansatz kann die hohe Schwebstoffkonzentration nur in der Zunahme der Weichsedimentschicht an der Sohle (hier mit einer Dichte von 360 kg/m³) nachgebildet

dargestellt werden. Die Reaktion der Sohlschicht wird unmittelbar dargestellt. Das Anwachsen der weichen Sohlschicht an beiden Standorten im Oberwasser ist repräsentativ für die Aggregation von Weichsedimenten an der Sohle. Die morphologische Reaktion auf die Zunahme der Weichsedimente blieb unberücksichtigt.

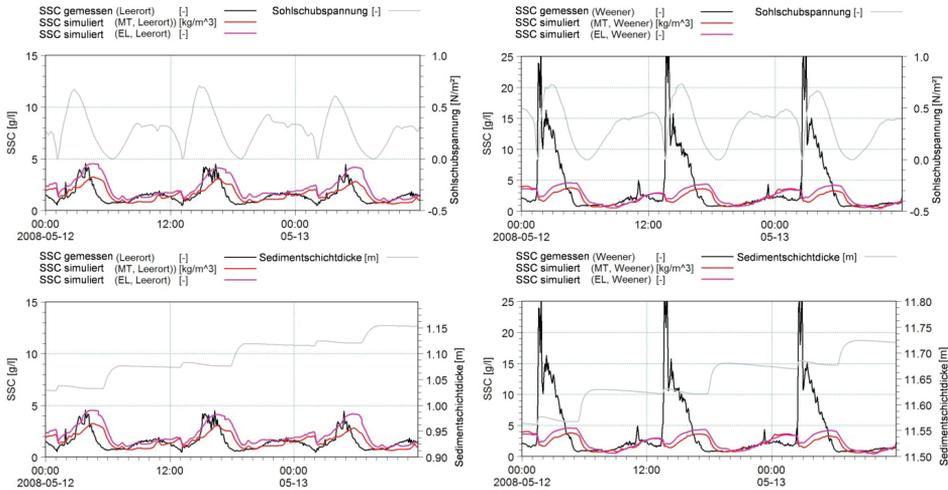


Abbildung 2: Vergleich der Zeitreihen für Simulationen und Messungen der Schwebstoffkonzentrationen im Jahr 2008 in Leerort (Ems-Km 14, links) und Weener (Ems-Km 7, rechts) mit der Simulation der Bodenschubspannung und der Dicke der Sohlschicht; die Messdaten wurden vom NWLKN Aurich zur Verfügung gestellt (SSC).

2.3 Bewertung der Sanierungspotentiale

Zur Bewertung der Sanierungsvarianten und ihrer Defizite wurden für Feinsedimente repräsentative Kennwerte für die hydrodynamischen Bedingungen und den Sedimenttransport ausgewählt. Die Kategorisierung der Kennwerte für Flutstromdominanz, Tidesymmetrien, Tidehub und Sedimenteintrag erfolgte entsprechend ihrer Bedeutung für den Transport von feinen Sedimenten. Für ein Ranking der Kennwerte wurden Erfahrungswerte aus unterschiedlichen Analysen sowie die vorhandene Fachliteratur (z. B. LANG 2003) herangezogen.

Ein wichtiges Ziel ist die Verringerung der Flutströmung, woraus sich eine Reduzierung des Sedimenteintrags ergibt. Der Längsschnitt des maximalen Gradientenverhältnisses von Flut- und Ebbströmung ist eine grobe Indikation für die Lage der Trübungszone im Längsschnitt, wobei nahe der Trübungszone höhere Werte verzeichnet werden. Eine Verringerung des Verhältnisses der maximalen Strömungen (Flutstromdominanz) und eine zusätzliche Verkleinerung des Tidehubs, und dabei insbesondere die Verringerung der Zunahme dieser beiden Parameter im Oberwasser, bewirkt eine Dämpfung des hypersynchronen Charakters. Eine Bewertung der Sanierungsmaßnahmen umfasst folgende hydrodynamischen Kennwerte:

- Verringerung der Tidesymmetrie basierend auf einem Netto-Strömungsverhältnis von weniger als 1; dieses beschreibt das Verhältnis zwischen Flutstrom und (Ebbstrom – Oberwasserzufluss). Darin enthalten ist eine Abnahme des Flutstroms

als Indikator für einen Rückgang des durch den Flutstrom induzierten Sedimenttransports und eine Zunahme des Ebbstroms.

- Verringerung des Verhältnisses der maximalen Strömungsgradienten von Flut- und Ebbstrom (dv/dt) in der Hauptrinne, das DRONKERS (1986) zufolge ein Indikator für Sedimenttransport ist und für die Dauer und Intensität der Resuspension oder Sedimentation nahe der Kenterung relevant ist.
- Reduktion der Flutstromdominanz auf Basis eines Verhältnisses der maximalen Flutströmung zur maximalen Ebbströmung in der Hauptgerinne von weniger als 1 (Flutstromdominanz mit einem Verhältnis von > 1); dieses zeigt auch den hypersynchronen Charakter des Ästuars und ist nach DRONKERS (1986) ein Indikator für den Transport grober Sedimente.
- Anhebung des Tideniedrigwassers als allgemeiner Indikator für eine Verbesserung der hydraulischen Situation mit der Folge einer Schwächung der maximalen Flutströmung und einer Stärkung der maximalen Ebbströmung.
- Verringerung des Tidehubs durch Vermeidung einer Zunahme des Tidehubs von der Mündung zu Abschnitten im Oberwasser der Maßnahmen (hypersynchroner Charakter) als allgemeiner Indikator für eine Verbesserung der hydraulischen Situation.

Die Wirkung der Sanierungsmaßnahmen wird anhand der Veränderung beim Nettosedimenttransport in Nähe der Mündung und der Verlagerung der Trübungszone beurteilt. Ein im jährlichen Mittel exportierendes System im Bereich der Mündung bis hin zu den Abschnitten im Oberwasser führt zu einer langfristigen Verminderung der Schwebstoffkonzentration in der Unterems. Ein Wechsel vom Sedimentimport zum Export im Emder Fahrwasser (das an die Mündung der Unterems angeschlossen ist) stellt eine wesentliche Veränderung dar. In diesem exportierenden System lässt sich die Ansammlung von Feinsedimenten in der Fahrrinne reduzieren und eine Veränderung der Korngrößenverteilung im Hauptgerinne erreichen. Begrenzte Sedimentimportzonen in oberstromigen Abschnitten werden als weniger kritisch für die gesamte Situation bewertet.

Eine Reduktion der querschnitts- und tidegemittelten Schwebstoffkonzentrationen mit einer flussabwärtigen Verschiebung der Trübungszone sollte erreicht werden. Eine solche Verschiebung ist ein Hinweis auf einen geringeren Sedimenttransport und somit eine verringerte Schwebstoffbewegung oder -resuspension infolge der reduzierten Tidedynamik. Die flussabwärtige Verschiebung ist folglich ein Indikator für einen Wechsel hin zu geringeren Trübungen. Folgende sedimentologische Kennwerte sind für die Bewertung der Sanierungsmaßnahmen relevant:

- Abnahme des Nettosedimentimports und Wechsel zu einem Sedimentexport in Nähe der Mündung zu den stromauf gelegenen Abschnitten auf Basis eines querschnitts- und tideintegrierten Sedimenttransports
- Flussabwärtige Verschiebung und Verkleinerung der Trübungszone basierend auf einer mittleren Schwebstoffkonzentration ermittelt aus einer querschnitts- und tidegemittelten Schwebstoffkonzentration
- Rückgang der querschnitts- und tidegemittelten Schwebstoffkonzentration unter eine ökologisch als kritisch bewertete Schwelle mit einem Zielwert von 100 mg/l für den Süßwasserbereich.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die vorgestellten Methoden wurden zur Analyse der Effekte von Tidepoldern und lateralen Retentionen mit einer Kombination von Flachwasserzonen und reaktivierten Altarmen bei folgenden Szenarien angewendet:

- Für das Szenario A1 ist eine Verringerung der Wassertiefe der Ems von Leer bis Papenburg (Ems-Km 14 bis Km 0) von etwa -8 bis -5 m NN auf konstant -3.0 m NN erforderlich (Verflachung). Hier wurden zwei Unterszenarien mit ursprünglicher Sohlrauheit des Ausgangszustands und einer sandigen Sohle im Bereich der Verflachungsstrecke verglichen
- Szenario B beschreibt die Verlängerung des Emsästuars mit einem Rückbau des Wehrs in Herbrum kombiniert mit einer Tidespeicherung im Unterwasser durch zwei Retentionsräume, ein Polder bei Ems-Km 24 mit 200 ha und ein Polder bei Ems-Km 12 mit 400 ha. Beide Tidepolder haben ein Speichervolumen von 18 Mio m³.
- Szenario C1 sieht sechs Tidepolder entlang des Abschnitts zwischen Ems-Km 23,5 bis Km -7 (7 km flussaufwärts von Papenburg) vor mit einer Gesamtfläche von 1200 ha und einzelnen Polderflächen zwischen 400 und 50 ha und einem Speichervolumen von rund 29 Mio m³.
- Für das Szenario C2 wurden neun Tidepolder entlang des Abschnitts zwischen Ems-Km 14 und Km -6 (6 km flussaufwärts von Papenburg) eingebunden. Die Gesamtfläche beträgt 850 ha, die einzelnen Polder haben Flächen zwischen 150 und 50 ha. Das Speichervolumen beträgt rund 14,2 Mio m³.
- Szenario C3 mit acht Fluss Schleifen mit Flachwasserbereichen im Vorland zwischen Ems-Km 22 und Km -7 (7 km flussaufwärts von Papenburg) einschließlich einer Fläche von 400 ha mit 130 bis 30 ha wieder benetzten Flächen und einem Tidespeichervolumen von rund 10 Mio m³.

Die Verflachung (Szenario A1) stellt eine künstliche Rückkehr zu der ursprünglichen Sohllage vor der Vertiefung dar. Bei diesem Szenario wäre eine Schifffahrtsstraße von Papenburg bis Leer (zwischen Ems-Km 14 und Km 0) erforderlich. Ein solches Fahrwasser stromab von Leer und stromauf von Papenburg benötigt eine tiefe Sohllage, woraus sich ein Sohlgefälle zwischen dem Fahrwasser und dem Verflachungsbereich ergibt. Das Ergebnis ist ein Längsschnitt mit einem Plateau zwischen Ems-Km 14 und 0. Für das Verflachungsszenario wurden zwei Arten von Sedimenten analysiert: Sedimente mit den tatsächlichen Korngrößenverteilungen (schluffige Sohle) und Sedimente mit Sandfraktionen (sandige Sohle).

Die Auswirkungen einer Ästuarverlängerung wurden von SCHUTTERLAARS und DE JONGE (2011) ausführlich beschrieben und analysiert. Auf Basis eines analytischen eindimensionalen Ansatzes, in dem zwar die detaillierte Geomorphologie vereinfacht, die Ausbreitung der Tidewelle und der Transport kohäsiver Sedimente jedoch berücksichtigt wird, konnten sie nachweisen, dass der Standort des Tidewehrs einen Einfluss auf die Lage der Trübungszone hat. Die wichtigsten Ergebnisse ihrer Untersuchung waren: Bei der aktuellen Sohllage (hier 2005) einschließlich des Wehrs bei Herbrum hat das Emsästuar eine Länge, die knapp der Resonanzlänge der M2-Tide entspricht, sodass die Tidewelle den Charakter einer stehenden Welle hat. Bei flussaufwärtiger Verlängerung des Ästuars um mehr als 10 km durch Rückbau des Wehrs wurde im Modell eine

Verschiebung der Trübungszone von Leer und Papenburg flussabwärts nach Emden vorhergesagt. Ähnliche, wenn auch weniger bedeutende Effekte zeigten sich in einer von der BAW für das Emsästuar durchgeführten detaillierten numerischen 3D-Analyse (ROLLENHAGEN 2011), in der die Auswirkungen eines Absenkens der Wehrkrone in Herbrum von +1,8 m NN auf -0,5 m NN untersucht wurden. Die Verringerung der Wehrhöhe führte zu einer geringfügigen Reduktion der tidegemittelten Schwebstoffkonzentration und einer sehr kleinen Verschiebung der ETM. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde im Szenario B der vollständige Rückbau des Wehrs in Herbrum bis auf eine Sohllage von etwa -1,5 m NN betrachtet und mit dem Anschluss von zwei Tidepoldern flussabwärts kombiniert. Dadurch sollte die Wirkung der Verkleinerung der Trübungszone verstärkt und durch zusätzliche Maßnahmen der Tidehub verringert werden.

Bei der Anlage von Tidepoldern sind Parameter wie die Höhenlage der Sohle, ihre Größe (Volumen und Form), Lage sowie Zuflussbreite variabel. Um diese Parameter zu reduzieren, wurden für alle Tidepolder folgende Annahmen getroffen: die Poldersohle wurde auf Grundlage des mittleren Tideniedrigwassers im aktuellen Zustand definiert, die Anbindung der Polderflächen an die Hauptrinne erfolgt über ein Rechteckprofil, die Länge der Zuflussrinnen ist auf einige 100 m begrenzt und die Form der Polderfläche als Rechteck vereinfacht. Lediglich die Lage und Größe variieren, wobei die Zuflussbreite im Unterwasser verringert wurde. Für die Polder in der Nähe und im Unterwasser von Leerort (Ems-Km 14) wurde hier mit einer Zuflussbreite von 30 bis 40 % der Breite der Hauptrinne ein Phasenverschiebungseffekt erzielt. Für die flussaufwärts gelegenen Polder wurde eine Zuflussrinne mit einer Öffnungsbreite von ca. 50 bis 70 % der Hauptfahrinne verwendet.

Bei der lateralen Retention werden tiefe Nebenarme (Flusschleifen) mit flachen, nur bei Tidehochwasser benetzten Vorlandflächen kombiniert. Wie im Fall der Tidepolder sind verschiedene Parameter wie beispielsweise das Breiten-Tiefen-Verhältnis, die Höhenlage des Nebenarms und der Vorlandfläche, die Lage, Form und Art der Nebenarme variabel. Entsprechend wurde von folgenden Annahmen ausgegangen: Die Breite der Nebenarme wird zwischen 75 und 90 % der Hauptrinnenbreite angesetzt, die Höhenlage ca. 1,5 m über dem mittleren Tideniedrigwasser, die Höhenlage des Vorlands etwa 1 m unter Tidehochwasser, und die Lage der Nebenarme richtete sich nach den Altarmen.

Bei allen Szenarien erfolgte die Simulation auf Grundlage der oben beschriebenen numerischen Ansätze für die hydrodynamischen Gegebenheiten, den Salzgehalt sowie Sedimenttransport. Die beschriebenen Sanierungselemente werden unter Betrachtung eines kurzfristigen Zeitraums – die Messungen der Tidezyklen vom Mai 2008 bei Borkum erstrecken sich über 3,5 Wochen (T_{nw} +1,27 m NN, T_{hw} -1,97 m NN, Tidehub 3,25 m bei Knock) – und Berücksichtigung eines konstanten Oberwasserabflusses von 88,11 m³/s (MQ) am oberstromigen Modellrand (Bollingerfähr) in die Simulationen eingeschlossen. Die Schwebstoffkonzentration und der Salzgehalt wurden am seeseitigen Modellrand mit 0,02 g/l beziehungsweise 30 PSU und am oberstromigen Rand mit 0,05 g/l beziehungsweise 0.34 PSU vorgegeben.

3.1 Hydrodynamische Wirkung

Die Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich ihrer hydrodynamischen Wirkung: Die Verflachung (A1) zeigte eine negative Wirkung im Unterwasser der Maßnahme und positive

Effekte im Maßnahmenbereich und Oberwasser: Die negativen Auswirkungen im Unterwasser sind eine geringfügige Zunahme des Tidehubs um einige Zentimeter, eine Abnahme des Tideniedrigwassers sowie eine Zunahme des Tidehochwassers (Abb. 3). Zusätzlich kam es zu einer Zunahme der Flutstrom-Maxima und damit einer Verstärkung der Flutstromdominanz. Im Maßnahmenbereich und im Oberwasser reduziert sich der Tidehub um bis zu 1,4 m (A1, Abb. 3, oben rechts).

Im Szenario mit Ästuarverlängerung (B) zeigte sich eine positive Wirkung auf die Wasserstände mit einer Reduktion des mittleren Tidehubs um bis zu 1,1 m (Abb. 3, oben rechts). Alle Szenarien mit Tidepoldern und Flachwasserzonen zeigten eine kontinuierliche Reduktion des mittleren Tidehubs um bis zu 2 m (C1 und C2) und 0,8 m (C3). Für den maximalen Tidehub im Längsschnitt ergibt sich in allen Szenarien (B, C1 bis C3) eine leichte Reduktion auf etwa 3,4 m und eine Verschiebung des Maximums stromab von seiner Lage zwischen Ems-Km 10 und 40 in den Abschnitt zwischen Ems-Km 30 und 40.

Die Polder- und Flachwasserszenarien zeigten eine Reduktion der Flutstromdominanz auf Basis des Verhältnisses des maximalen Gradienten von Flutströmung zur Ebbströmung (Abb. 3, unten links) um 30 % (C1), 25 % (C2) und 15 % (C3) zwischen Ems-Km 40 und 15 sowie um 20 % (C1, C2 und C3) zwischen Ems-Km 15 und -5. Das lokale Maximum der Flutstromdominanz verringert sich von einem Gradientenverhältnis von 1,3 (aktueller Zustand, Abb. 3) auf eine geringfügige Ebbstromdominanz mit ca. 0,9 (C1 und C2, Abb. 3), es kommt jedoch zu keiner flussabwärtigen Verschiebung. Lediglich bei Szenario C3 verschiebt sich das lokale Maximum um 10 km flussabwärts, es besteht jedoch immer noch eine Flutstromdominanz (1,0) zwischen Ems-Km 10 und Km 20. Das Maximum des Gradienten-Verhältnisses von Flut- und Ebbstrom von aktuell 8,0 verschiebt sich in allen Szenarien von seiner Lage nahe Papenburg (Ems-Km 0, Abb. 3) flussabwärts zu Ems-Km 20 bis 40. Die durch die Szenarien bewirkte Reduktion des Verhältnisses erreicht 3,0 in Szenario C3, 2,5 in C2 und 2,0 in C1.

Ein wichtiger Effekt zeigte sich im Netto-Verhältniswert aus Flut- und Ebbstrom ohne Oberwasserabfluss (hier MQ) als Verhältniswert des tideabhängigen Volumenstroms (Abb. 3, oben rechts). Das Netto-Volumenstrom-Verhältnis, welches nahe Ems-Km 0 (Papenburg) einen Scheitelwert von Faktor 2,0 hat, verschob sich in Szenario A1 um ca. 5 km flussabwärts, verringerte sich jedoch nur geringfügig auf 1,6 (A1). Eine flussabwärtige Verschiebung tritt in Szenario B nicht auf, aber der Scheitelwert reduziert sich auf rund 1 (Abb. 3). C1 und C2 bewirken eine Verschiebung des Scheitelwerts des Netto-Volumenstrom-Verhältnisses um etwa 10 km flussabwärts und eine Verringerung auf 1,0 (C1) beziehungsweise 1,1 (C2). In Szenario C3 fällt die flussabwärtige Verschiebung mit ca. 20 km größer aus; der Scheitelwert verringert sich auf 1 (Abb. 3).

Bei Betrachtung des in Abb. 3 (unten rechts) dargestellten Flutstroms (Volumen/Dauer) sind zusätzlich unterschiedliche Effekte durch den erweiterten Polderabschnitt in C1 und die reduzierten oberstromigen gelegenen Polder in C2 erkennbar. Jeder Tidepolder führt zu einer Zunahme des Tidevolumens (Flut- und Ebbvolumen) im Unterwasser bedingt durch die größere benetzte Fläche (Geomorphologie) und einer Abnahme im Oberwasser. Darüber hinaus kommt es zu einer leichten Dämpfung der Tideasymmetrie mit einer kürzeren Dauer des Ebbstroms und einer längeren Dauer des Flutstroms. Im Unterwasser der Tidepolder überlagern sich somit zwei unterschiedliche Effekte: eine Zunahme des Flutvolumens als negativer Effekt und eine Zunahme der

Flutdauer als positiver Effekt. Ab einem gewissen Abstand zu den flussaufwärtigen Poldern tritt ein positiver Effekt mit einer Reduktion des Flutstroms (Volumen/Dauer) auf. Diese erstreckt sich über eine größere Länge und nimmt an Intensität zu, wenn die Tidepolder ins Oberwasser verlegt werden (Abb. 3). Dieser positive Effekt von im Oberwasser gelegenen Poldern wurde auch von ROLLENHAGEN (2011) und im Rahmen einer detaillierten Analyse von CHERNETSKY (2012) untersucht.

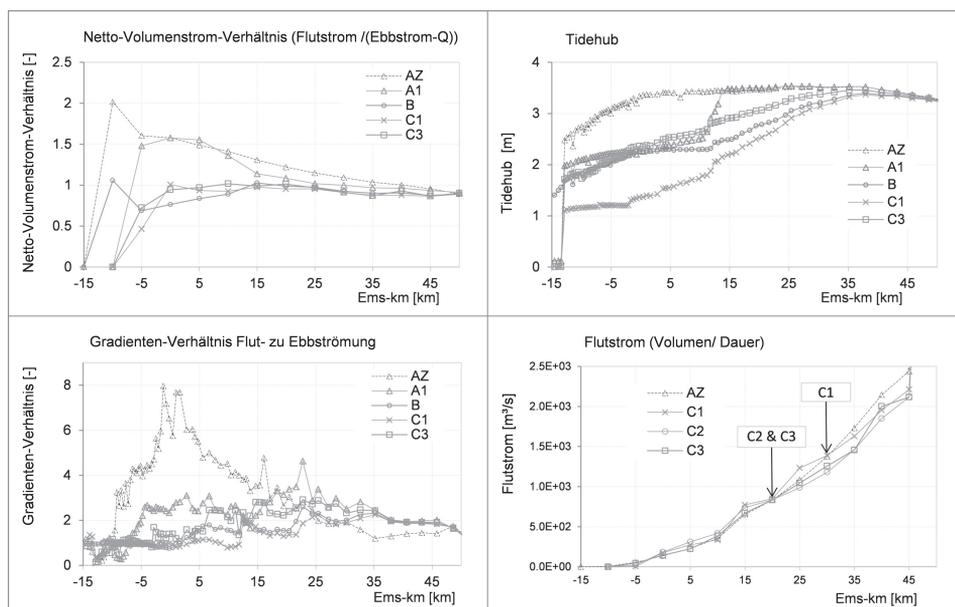


Abbildung 3: Längsschnitte für die hydrodynamischen Indikatoren Netto-Volumenstrom-Verhältnis (oben links), Tidehub (oben rechts), Verhältnis der maximalen Gradienten aus Flutströmung zur Ebbströmung (unten links) und Flutstrom (unten rechts) für den aktuellen Zustand (AZ) und die Szenarien A1, B, C1, C2 (für den Flutstrom) und C3.

Für die Hydrodynamik ergaben sich bei Szenario C2 mit einer um 30 % reduzierten und flussaufwärts verlagerten Polderfläche die positivsten Effekte auf die Tideströmungen, den Tidehub sowie den tideabhängigen Volumenstrom. Die geringsten hydrodynamischen Effekte wurden mit der lateralen Retention aus Szenario C3 erzielt.

Szenario A1 zeigte Nachteile im Unterwasser der Maßnahme, wobei jedoch im Maßnahmenbereich selbst und im Oberwasser eine deutliche positive Wirkung auf den Tidehub und die Tideströmungen zu verzeichnen war. Die negativen Effekte bestanden in erster Linie in dem steilen Anstieg der Sohlage im Bereich der Verflachung, welche mit einer festen Bodenschwelle vergleichbar ist. Dies verursacht eine Reflexion der Tidewelle dadurch eine Zunahme der Tidesymmetrie im Unterwasser. Im Oberwasser der Maßnahme traten Rückstauwirkungen mit lang anhaltenden verringerten Strömungen sowie einer signifikant verkleinerten Oszillation des Tidewasserstands auf. Das Ansteigen des Tideniedrigwassers wird durch die Anhebung der Sohlage und die Verkleinerung der benetzten Fläche im Maßnahmenbereich induziert. Dies zeigt sich auch in einer Abnahme des Flut- und Ebbvolumens.

3.2 Wirkung auf den Schwebstofftransport

Indikatoren für einen Sedimenttransport wie beispielsweise der Nettosedimentfluss, eine Verlagerung der Trübungszone (ETM) und die Schwebstoffkonzentration (tidegemittelt und querschnittsintegriert) wurden in allen Szenarien berücksichtigt. Ein wichtiger Indikator für eine mesoskalige Veränderung der Schwebstoffkonzentration wurde aus der Ausdehnung und der Intensität des Sedimentexports von der Mündung des Emsästuars (Emder Fahrwasser) abgeleitet. Für den Ausgangszustand mit einem mittleren Oberwasserabfluss (MQ) tritt ein Import in Mündungsnähe von etwa 2000 t/Tide auf.

Bei einer Verflachung (A1) verschiebt sich die ETM flussabwärts in die Nähe von Ems-Km 15. Diese Verschiebung wird von einem leichten Rückgang des Sedimentimports, aber auch von einer Verlängerung der Importzone nach stromauf begleitet. Die unterschiedlichen Sedimente im Bereich der Verflachungsstrecke (A1), schluffige Sedimente (wie im Ausgangszustand) und sandige Sedimente (A1s) hatten lediglich eine geringfügige Wirkung auf die Hydrodynamik. Die Sedimente spielen bei der Sedimentdynamik eine wichtige Rolle. So verlagert sich bei einer schluffigen Gewässersohle die ETM flussabwärts, von Ems-Km -5 nach Ems-Km 15 und mit einem starken Anstieg von 3,2 g/l auf 4,5 g/l (A1). Eine sandige Sohle in der Verflachungsstrecke weist dieselben Import- und Exporteigenschaften auf und auch die Zone des Trübungsmaximum verlagert sich nach stromab, von Ems-Km -5 nach Ems-Km 15, allerdings mit einem Rückgang von 3,2 g/l auf 2,4 g/l (A1s). Zusätzlich liegt eine größere natürliche Wassertiefe vor als vorgesehen. Dies hat eine Erosion der Verflachung und dadurch eine zusätzliche Trübung zur Folge.

Bei der Ästuarverlängerung (B) ist die ETM geringfügig von 3,2 auf 2,5 g/l verringert, mit Verschiebung um 5 km nach stromauf dies hat jedoch einen positiven Effekt auf den relevanten Sedimentexport über das Emder Fahrwasser. Die flussaufwärtige Verlagerung der Trübungszone wirkt sich in zweierlei Hinsicht aus: der bereits im hydrodynamischen Verhalten erkennbare Einfluss der Tide nimmt zu und im Oberwasser des früheren Wehrs bei Ems-Km -15 setzt eine Sedimentmobilisierung ein. Aufgrund des Rückbaus des Wehrs ist der Wasserstand von der Tide beeinflusst (ca. 1,5 m, s. Abb. 3). Entsprechend verstärken sich die Strömungen – wo vorher Rückstaueffekte vorlagen ergeben sich nun ebbstromdominierte Strömungen. Im Oberwasser des rückgebauten Wehrs (Ems-Km -15 bis -20) treten nur noch Tidewasserstände auf, jedoch keine Flutströmungen (im Oberwasser), was zu einer Mobilisierung des Sediments führt, insbesondere während Tideniedrigwasser und stärkerer Strömungen (Anstieg um ca. 200 %). Durch diese Prozesse erhöht sich die Sedimentkonzentration auf bis zu 0,9 g/l flussaufwärts von Ems-Km -15 aufgrund einer kurzfristigen Mobilisierung der anstehenden Feinsedimente.

Die Maßnahmen Tidepolder (C1, C2) und laterale Retention (C3) bewirken kurzfristig nur eine geringfügige Abnahme der Schwebstoffkonzentration. Die Trübungszone jedoch verlagert sich um 14 km flussabwärts mit einer Reduktion auf 2,3 g/l (C1), um 16 km mit einer Reduktion auf 2,7 g/l (C2) sowie um 5 km mit einer Reduktion auf 2,0 g/l (C3). Durch Szenario C1 wurde die Reichweite des Sedimentexports mit ca. 10000 t/Tide bis ungefähr Ems-Km 20 verringert. Dies wurde bereits im Rahmen der hydrodynamischen Beurteilung (s. Flutstrom) analysiert. In C2 und C3 wird die Exportzone bis Ems-Km -15 mit ca. 9000 t/Tide (C2) beziehungsweise 8000 t/Tide (C3) verlängert.

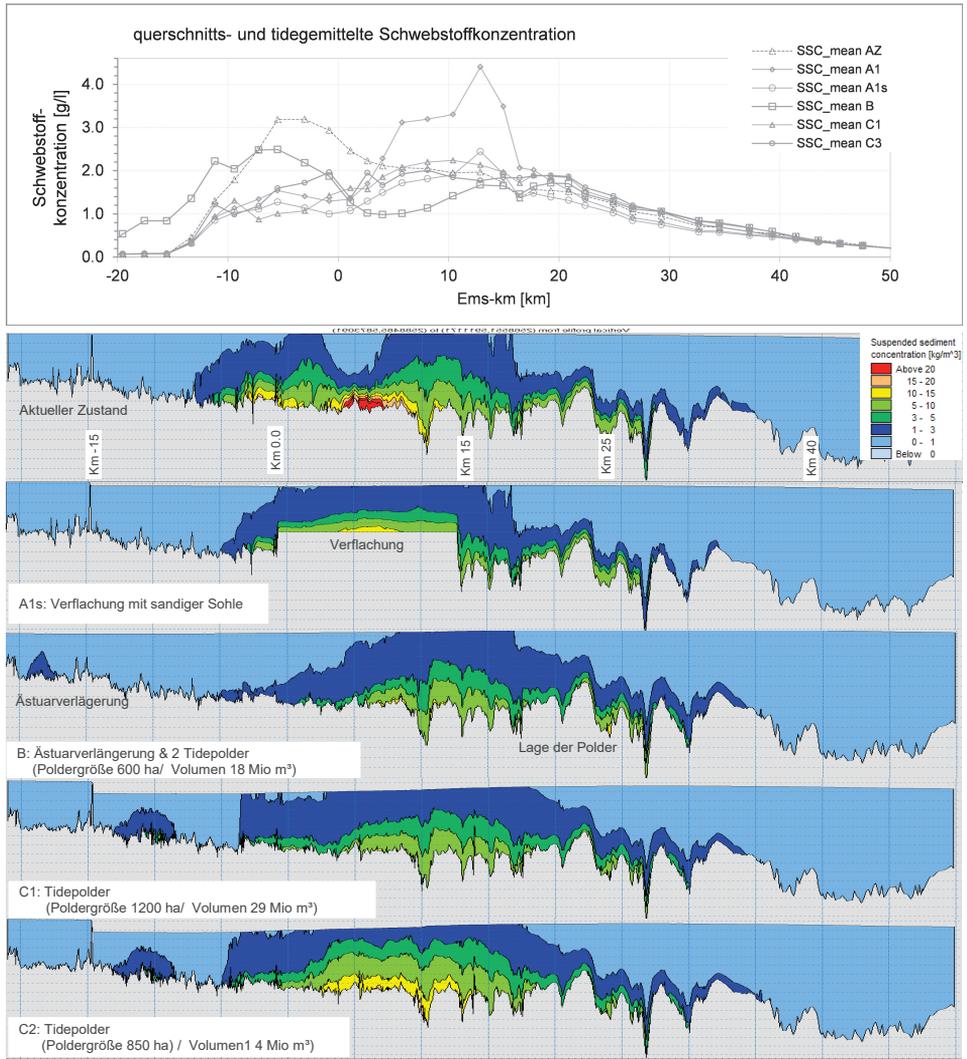


Abbildung 4: Längsschnitte der querschnittsgemittelten und tideintegrierten Schwebstoffkonzentration (oben) und zweidimensionale Längsschnitte der Schwebstoffkonzentration in der Flussachse bei Tidehochwasser für den aktuellen Zustand (2. Grafik), bei Verflachung mit sandiger Sohle (A1s, 3. Grafik), bei Ästuarverlängerung mit zwei Tidepoldern (B, 4. Grafik), bei Anlage von sechs Tidepoldern (C1, 5. Grafik) und bei Anlage von neun Tidepoldern (C2, 6. Grafik).

Die Verflachungs-Szenarien auf Grundlage der aktuellen Sedimenteigenschaften zeigten kurzfristig negative Einflüsse auf den Sedimenttransport und eine Zunahme der Trübungszone. Die mit einer Verflachung verbundenen hohen Trübungen werden zusätzlich durch die Diskontinuität zwischen der Verflachung und dem Fahrwasser weiter stromab angetrieben. Die flussabwärtige Verschiebung der ETM wird als positiver Effekt bewertet, der repräsentativ für eine Zustandsverbesserung im Maßnahmenbereich und im Oberwasser der Maßnahme ist. Die zunehmende Reichweite des Nettosedimentimports vom Emden Fahrwasser zeigt eine mittelfristige Verschlechterung der Situation in der

Ems an. Dies steht im Einklang mit dem negativen Einfluss auf die Hydrodynamik in diesem Gewässerabschnitt mit einer Zunahme der Flutstromdominanz, des Tidehubs und der Tideasymmetrie. Für die sandige Sohle wurde eine Reduktion der Trübungszone, jedoch eine vergleichbare Sedimentdynamik mit einem Nettosedimentimport und Exportzonen wie oben beschrieben.

4 Schlussfolgerungen

4.1 Sanierungspotential

In Szenario A1 ist im Bereich der Sohlverflachung eine freie Veränderung der Morphologie ohne Gewässerunterhaltung möglich. Die Verflachung bietet ein zusätzliches Sanierungspotential als Sedimentfalle in diesem Abschnitt. Die Annahme sandiger Sedimente an der Sohle führte zu einer Verminderung der Trübungszone, die sich um etwa 17 km nach stromab verschob, während der Nettosedimenttransport in Mündungsnähe nur leicht zurückging, die Transportstrecke aber bis nach Oberwasser verlängert war. Diese Importzone wird als sehr nachteilig für beide Szenarien (schluffig & sandig) bewertet, da sie einen anhaltenden Import von Feinsedimenten aus der Nordsee sowie eine Verstärkung der Trübung bedeuten. Im Unterwasser der Maßnahme sind keine Veränderungen der Sedimentologie (Aufrechterhaltung der bestehenden Morphologie) erkennbar. Das Sanierungspotential und die Möglichkeiten einer freien Entwicklung der Ems im Verflachungsabschnitt wurden für beide Szenarien zusammen als gering bis mittel bewertet, wobei die oben erwähnten Nachteile zu berücksichtigen sind.

Eine Verlängerung des Emsästuars in Verbindung mit Tidepoldern nahe Emden zeigte in der kurzfristigen Entwicklung der Trübungszone mit einer flussaufwärtigen Verlagerung und nur geringfügigen Abnahme Defizite an. Der positivste Effekt ist die mittelfristige Reduktion der Feinsedimente in der Unterems als Folge des Wechsels von einem Sedimentimport zu einem Export. Aufgrund der negativen Entwicklung der Trübungszone mit der oben erwähnten flussaufwärtigen Verschiebung wurde das Sanierungspotential dieses Szenarios als niedrig bewertet.

In der kurzfristigen Entwicklung ließen sich für die Varianten Tidepolder und laterale Retention signifikante Veränderungen erzielen, so eine bedeutende Verbesserung der hydrodynamischen Indikatoren. Die Sedimentdynamik wurde durch eine leichte Verschiebung der Trübungszone flussabwärts verbessert, allerdings sank die Schwebstoffkonzentration nicht unterhalb den definierten kritischen Schwellenwert von 100 mg/l. Dennoch zeigten alle Szenarien einen Wechsel von Sedimentimport zu -export in Nähe der Mündung, was als Indikator für eine weitere Verbesserung und eine Reduktion der Schwebstoffkonzentration bewertet werden kann. Diese Reduktion ist jedoch eng an eine morphodynamisch Veränderung gekoppelt sowie an Veränderungen der Sedimentzusammensetzung, die zu größeren Sedimentfraktionen in der unteren Ems führen sollten. Infolge anthropogener Eingriffe wie beispielsweise regelmäßige Fahrrinnenvertiefungen, Uferdeckwerke und wasserwirtschaftliche Maßnahmen für das Hinterland steht für morphodynamische Veränderungen lediglich ein schmaler Korridor zur Verfügung. Aus diesem Grund bieten benetzte Gebiete wie Polder oder Flachwasserzonen mit zugelassenen Änderungen der morphodynamischen Gegebenheiten ein größeres Sanierungspotential (Tab. 1).

Ein mittelfristiges Sanierungspotential wurde anhand der qualitativen Einstufung des flussaufwärtigen Nettosedimentexports sowie der kurzfristigen Verschiebung und Reduktion des Trübungsmaximums ermittelt. Die Bewertung des mittelfristigen Sanierungspotentials erfolgt nur in qualitativer Form (Tab. 1). Sie ergibt das höchste Potential für Szenario C2 aufgrund des positiven Effekts der flussaufwärtigen Tidepolder, des erweiterten Nettosedimenttransports und der signifikanten flussabwärtigen Verschiebung der Trübungszone. Szenario C1 weist einige Defizite aufgrund der nachteiligen Wirkung des mündungsnahen Polders auf. Zudem fällt der Sedimentaustrag höher aus, wobei seine Reichweite jedoch kürzer ist als im Szenario C2 mit den kleineren flussaufwärtig gelegenen Poldern. In den Flachwasserzonen der Bereiche mit lateraler Retention (C3) kommt es zu einer Ansammlung von Sedimenten. Dies führt mittelfristig zu einer Verringerung der Auffangeffekte.

Eine starke Korrelation zwischen den hydrodynamischen Veränderungen, wie beispielsweise Tidehub oder Flutstromdominanz, und dem Sedimenttransport, zum Beispiel netto Sedimenttransport oder Trübungszone, ließ sich nicht herstellen. Die isolierte Interpretation des Sanierungspotentials ausschließlich auf der Grundlage der hydrodynamischen Indikatoren kann dazu führen, dass eine eine unzureichende Sanierungsvariante Priorität erhält.

Tabelle 1: Mittelfristiges Sanierungspotenzial der Sanierungsvarianten für die Ems.

Kennwert	Szenario A1s (Verflachung mit sandiger Sohle)	Szenario B (Ästuarverlängerung & Tidepolder)	Szenario C1 (Tidepolder)	Szenario C2 (Tidepolder)	Szenario C3 (laterale Retention)
Morphologisches Entwicklungspotential: Bereich und Abschnitt	Verflachung über 14 Fließkilometer	Polderflächen 600 ha, Verlängerung über 9 Fließkilometer	Polderflächen 1200 ha über 31 Fließkilometer	Polderflächen 850 ha über 20 Fließkilometer	Retentionsbereich 400 ha über 29 Fließkilometer
Nettosedimenttransport (Flut – Ebbe): Sedimentexport von der Mündung (Intensität und Reichweite)	Zunahme der Reichweite des Sedimentimports bis zu Ems-Km 35 mit 800 t/Tide	Reichweite bis Ems-Km 20 mit Export von 10.000 t/Tide Negativer Einfluss des mündungsnahen Polders	Reichweite bis Ems-Km 20 mit Export von 10.000 t/Tide Negativer Einfluss des mündungsnahen Polders	Reichweite bis Ems-Km 15 mit Export von 9000 t/Tide Kein negativer Einfluss in Nähe der Mündung	Reichweite bis Ems-Km 15 mit Export von 8000 t/Tide Kein negativer Einfluss in Nähe der Mündung
Flussabwärtige Verschiebung der Trübungszone: Intensität und Strecke	Flussabwärtige Verschiebung um 17 km, Reduktion auf 2,4 g/l	Flussaufwärtige Verschiebung um 5 km, jedoch Reduktion auf 2,5 g/l	Flussabwärtige Verschiebung um 14 km, Reduktion auf 2,3 g/l	Flussabwärtige Verschiebung um 16 km, Reduktion auf 2,7 g/l	Flussabwärtige Verschiebung um 5 km, Reduktion auf 2,0 g/l
Sanierungspotential	niedrig	niedrig	mittel	hoch	mittel

4.2 Allgemeine Schlussfolgerungen

Die Verflachung, welche sich wie eine feste Bodenschwelle auswirkt, zeigte in der kurzfristigen Entwicklung negative Auswirkungen auf die Hydrodynamik und den Sedimenttransport. Die Veränderung der Sohllage bewirkt das Auftreten einer Diskontinuität. Eine vereinfachte Analyse der morphologischen Stabilität der Verflachungsstrecke zeigte, dass an dieser Bodenschwelle Erosionserscheinungen auftreten werden. Die horizontale Verflachungsstrecke wird folglich eine Neigung entwickeln. Bei einer Verflachung mit sandigen Sohle nehmen die positiven Effekte auf die Hydrodynamik zu und die Sedimentkonzentration geht stark zurück.

Die Verlängerung in Kombination mit zwei flussabwärts gelegenen Poldern lieferte andere Ergebnisse als vorhergehende Studien. So untersuchten SCHUTTELAARS und DE JONGE (2011) in einem 1D-Ansatz eine flussabwärtige Verschiebung der Trübungszone. ROLLENHAGEN (2011) untersuchte in einer 3D-Analyse eine Reduktion des Trübungsmaximums ohne signifikante Verschiebung flussabwärts. Die unterschiedlichen Untersuchungsergebnisse sind in den unterschiedlichen Annahmen begründet: in der vorliegenden Studie wurde von einem vollständigen Rückbau des Wehrs ausgegangen, die zu einer Verlängerung des tidebeeinflussten Ästuarbereichs führte. Kurzfristig führt dieser Einfluss der Gezeiten zu einer Mobilisierung von feinen Sedimenten in Nähe des früheren Wehrs. Aufgrund der Ästuarverlängerung verlagert sich die Trübungszone in die oberstromigen Abschnitte; es kommt aber außerdem zu einer Aufspaltung in zwei separate divergierende Trübungszone, wie auch in der 1D-Analyse offenbar wurde (SCHUTTELAARS und DE JONGE 2011). Eine dreidimensionale Analyse jüngerer Datums (JÜRGES 2013) mit einer Verlängerung und Verkürzung des Emsästuars ergab ein ähnliches Bild der Hydrodynamik und Sedimentdynamik wie hier dargestellt.

Unterschiede bezüglich der Lage, Verteilungen und des Retentionsvolumens haben einen Einfluss darauf, wie erfolgreich Retention und Sedimentfang sind. Insbesondere bei Tidepoldern (in C1, nahe Ems-Km 25) in der Nähe von Emden wie auch bei großen Poldern entlang des Flusses zeigten sich Defizite hinsichtlich Hydrodynamik und Sedimentdynamik: aufgrund einer früheren Strömungskenterung und Ebbstromphase im Polder verschärft sich die Flutstromdominanz. Somit kommt es zu einer Entwässerung der Polder vor Eintreten der Strömungskenterung in der Hauptrinne, wodurch die Flutströmungen verstärkt und der lokale Sedimentimport vergrößert wird. Aber auch große Tidepolder im Oberwasser, deren Fläche mehr als 250 ha beträgt, zeigten negative lokale Auswirkungen: Als Folge des Wechsels von einem Nettosedimentexport im Unterwasser zu einem Sedimentimport im Oberwasser verstärkten sich die Flutströmungen im Bereich des Zuflusses, begleitet von einer Erosionstendenz.

5 Ausblick

Auch wenn die Analyse der kurzfristigen Entwicklung keine endgültigen Erkenntnisse über die Nachhaltigkeit der Renaturierungsmaßnahmen liefert, ist sie dennoch für das Aufdecken von Defiziten und eine Optimierung künftiger Sanierungsvarianten unverzichtbar. Weitere Analysen der langfristigen morphodynamischen Veränderungen werden nur für Szenarien mit hohem Sanierungspotential empfohlen.

Die bereits von DONNER und NEHLSSEN (2012) vorgestellten zentralen Ergebnisse für ein System der Dynamik kohäsiver Sedimente lassen sich auf ein Langfristkonzept für das Emsästuar übertragen. Dafür besteht eine erste Anforderung in der Verfügbarkeit von Beobachtungsdaten zu Sedimentdynamik und morphologischen Veränderungen einschließlich der Baggertgutmenge. Die Bewertung einer Simulation von Veränderungen der Sohlage ist nur anhand beobachteter Veränderungen möglich. Zusätzlich sind für die Reproduktion eines typischen jährlichen Zyklus unterschiedliche (beispielsweise monatliche) Szenarien für Oberwasserzufluss und Tide auszuwählen. Ein vergleichbares langfristig angelegtes Konzept für ein Ästuar mit signifikant niedrigen Schwebstoffkonzentrationen (s. DONNER und NEHLSSEN 2012) zeigte bereits, dass eine morphologische Beschleunigung zusammen mit dem ausgeprägt nichtlinearen Muster aller Sink- und Erosionsprozesse auf sehr niedrige Faktoren begrenzt sein wird. So wurde die morphologische Beschleunigung für Sedimentkonzentrationen von bis zu 1 g/l auf den Bereich zwischen 1 und 6 begrenzt, um eine durch fehlende Daten zur morphologischen Rückkopplung bedingte Überschätzung der Deposition zumindest in Flachwasserzonen zu vermeiden. Jeder langfristige Ansatz für das Emsästuar wird daher Beschränkungen unterliegen, zum einen aufgrund der unzureichenden Datenlage und zum anderen aufgrund der sehr hohen Schwebstoffkonzentrationen, die zu einem nichtlinearen Muster führen, welches sich kurzfristig nicht auf ein nahezu lineares Verhalten vereinfachen lässt, wie es im Fall von sandigen Gewässersohlen möglich wäre.

Nichtsdestoweniger ist eine Schätzung der langfristigen Effekte auf das suspendierte Sediment und die Sedimentzusammensetzung erforderlich, um das Potential der Sanierungsszenarien hinsichtlich Reduktion des Sedimenteintrags und der extrem hohen Schwebstoffkonzentrationen auf längeren Zeitskalen zu bewerten. So könnten eine weitere Reduktion und flussabwärtige Verschiebung der Trübungszone innerhalb eines kurzen Zeitraums ein Hinweis auf eine Tendenz zur Verbesserung des Zustands in der Ems sein.

6 Danksagung

Das gemeinschaftliche Forschungsvorhaben des WWF Deutschland, BUND, NABU und der Technischen Universität Berlin „Perspektive Lebendige Unterems“ wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) und der Niedersächsischen Bingo-Umweltstiftung (BINGO) gefördert. Wir danken dem Projektteam für die Unterstützung und den Experten von Wasserwirtschaftsbehörden und internationalen Experten in der Project Review-Gruppe für die fruchtbaren Diskussionen. Des Weiteren danken wir H. H. Nguyen für seine Forschungsarbeit zum Einfluss der effektiven Flockendichte auf die Sinkgeschwindigkeiten.

7 Schriftenverzeichnis

- BURT, T. N.: Field settling velocities of estuary muds. In *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*, A. J. Mehta, Ed, Springer-Verlag, 126-150, 1986.
- CHERNETSKY, A.: Trapping of sediment in tidal estuaries, PhD-Thesis, TU Delft, 2012.
- DONNER, M.; LADAGE, F.; STOSCHEK O. and NGUYEN H. H.: Methods and analysis tools for redevelopments in an estuary with high suspended sediment concentrations, Conference Proceedings, ICCE 2012; Santander, Spain, 2012.

- DONNER, M. and NEHLESEN, E.: Impact analysis of anthropogenic stresses based on a morphodynamic long-term approach; Proceedings of IAHR 2012; München, Deutschland.
- DRONKERS, J.: Tidal Asymmetry and estuarine morphology, *Netherlands Journal of Sea Research* 20 (2/3), 117-131, 1986.
- JÜRGES, J. und WINKEL, N.: Ein Beitrag zur Tidedynamik der Unterems, Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg, Referat Ästuarsysteme II, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 86, 2003.
- JÜRGES, J.: Grundsatzuntersuchung zur Verlängerung des Emsästuars, Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg, Vortrag im Rahmen des BAW Kolloquiums „Projekte und Entwicklungen für aktuelle Fragestellungen im Küstenwasserbau“ am 19.09.2013.
- KRONE, R. B.: Flume studies of the transport of sediment in estuarial processes, Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, Univ. of California, Berkeley, California, Final Report, 1962.
- LANG, G.: Analyse von HN-Modell-Ergebnissen im Tidegebiet, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (Federal Waterways and Engineering Institute), Nr. 86, 2003.
- LI, Z. H.; NGUYEN, K. D.; BRUN-COTTAN, J. C. and MARTIN, J. M.: Numerical simulation of the turbidity maximum transport in the Gironde estuary, France, *Oceanologica Acta*, 1994.
- NGUYEN, H. H. and Chua, L.H.C.: A Simplified Physically-based Model for Estimating Effective Floc Density. *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, doi: 10.1061/ASCE HY.1943-7900.0000355, 2010.
- NGUYEN, H. H.: Modelling the Transport of Fine Suspended Sediments, PhD-Thesis, Nanyang Technological University, Singapore, 2012.
- NLWKN Aurich: Emssperrwerk Gandersum Herbst – Probestau vom 27. bis zum 29.09.08 mit Überführung der CELEBRITY SOLSTICE von Papenburg nach Gandersum, Gewässerkundlicher Landesdienst, 2009.
- PARTHENIADES, E.: Erosion and deposition of cohesive soils, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers (ASCE)*, Volume 91 (HY1), 105-139, 1965.
- ROLLENHAGEN, K.: Untersuchungen zur Minderung des Schlickeintrags in die Unterems – Vergleich von Lösungsvarianten, presentation at the colloquium of the Federal Waterways and Engineering Institute, 2011. Stand 22.09.2011: www.baw.de.
- SCHUTTELAARS, H. M. and DE JONGE, V.: Influence of the length of an estuary on tidal motion and sediment trapping, unpublished, 2009.
- SCHWEIM, C.: Modellierung und Prognose der Erosion feiner Sedimente, PhD-Thesis, RWTH Aachen, 2005.
- SMAGORINSKY, J.: General Circulation Experiments with Primitive Equations, *Monthly Weather Review*, H. 91, 1963.
- TALKE, S. A. and DE SWART, H. E.: Hydrodynamics and Morphology in the Ems/Dollard Estuary: Review of Models, Measurements, Scientific Literature, and the Effects of Changing Conditions, University of Utrecht, IMAU Report # R06-01, 2006.
- VAN RIJN, L. C.: *Manuel Sediment Transport Measurements in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*, Aqua Publications, Amsterdam, 2007.

- WEILBEER, H.: Numerical simulation and analyses of sediment transport processes in the Ems-Dollard Estuary with a three-dimensional model, Conference Proceedings, INTERCOH 2003, 2005.
- WINTERWERP, H.: On the Dynamics of High-concentrated Mud Suspensions, PhD-Thesis, TU Delft, 1999.
- WURPTS, A. and OBERRECHT, D.: A hydro-morphodynamic numerical study to reduce tidal asymmetry in the Ems Estuary, Germany, Conference Proceedings, ICCE 2012, Santander, Spain, 2012.
- ZANKE, U. C. E.: Grundlagen der Sedimentbewegung, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1982.