

# Numerische Simulation der Dynamik von Flüssigschlick in Ästuarsystemen – Überblick und Ausblick

Denise Wehr

## Zusammenfassung

Flüssigschlick (*fluid mud*) ist ein Gemisch aus feinen vorwiegend kohäsiven Sedimenten, Wasser und organischen Bestandteilen. Die rheologischen Eigenschaften sind die eines nicht-Newtonschen Fluides, somit unterliegt der Flüssigschlick einer eigenen Dynamik im Vergleich zum Wasserkörper mit geringer Schwebstoffkonzentration. Das Vorkommen von Flüssigschlick in Ästuaren und Küstenregionen kann sehr unterschiedliche räumliche Ausdehnungen von wenigen Zentimetern Schichtdicke zu kilometerlangen Flussabschnitten mit Flüssigschlicksschichten annehmen. Gleichzeitig reicht die zeitliche Skala der physikalischen Prozesse wie die Entstehung, Transport und Resuspension von Flüssigschlick von Sekunden bei der turbulenten Durchmischung bis zu Monaten bei kriechenden Schlicksschichten (MEHTA et al. 2014).

In den letzten Jahrzehnten hat der fortschreitende Ausbau von Seeschiffahrtsstraßen zu einer Zunahme der Verschlickung und Entstehung von Flüssigschlick in Bereichen der ästuarinen Schifffahrtsstraßen, Häfen und Hafeneinfahrten geführt. Der Bedarf an fundierten Kenntnissen über die Flüssigschlick-dynamik wächst, um neue Unterhaltungsstrategien und Renaturierungsmaßnahmen in Ästuaren zu entwickeln und bestehende zu optimieren. Numerische Modelle dienen als Werkzeug zur Beurteilung dieser Strategien und Maßnahmen.

In diesem Artikel werden die derzeitigen Möglichkeiten und die Leistungsfähigkeit eines neu entwickelten dreidimensionalen numerischen Modells zur Simulation der Flüssigschlickdynamik im ästuarinen Bereich zusammengefasst. Weiterhin werden Wege zur Weiterentwicklung des numerischen Modells aufgezeigt. Wichtige Aspekte sind hier Interaktion von Rheologie und Turbulenz in Ästuaren und der Einfluss von biologischen Parametern.

## Schlagwörter

Flüssigschlick, 3D numerisches Modell, kohäsive Sedimentsuspension, isopyknisches Modell, Rheologie

## Summary

*Fluid mud is a mixture of fine, mainly cohesive sediments, water and organic substances. The rheological behaviour of fluid mud is that of a non-Newtonian fluid; fluid mud is thus subject to its own dynamic compared to a water body with low suspended matter concentration. The occurrence of fluid mud in estuaries and coastal zones may vary spatially, from a few centimetres in layer thickness to river sections with fluid mud layers which are several kilometres long. The time variability of physical processes, such as the*

*formation, transport and dissipation of fluid mud extends from a few seconds for turbulent mixing to months for creeping mud layers (MEHTA et al. 2014).*

*The progressive extension and development of coastal waterways has led to an increase in siltation and the formation of fluid mud in sections of estuarine shipping channels, ports and port approaches in recent decades. The need for a better understanding and profound knowledge of fluid mud dynamics has increased and new maintenance strategies and renaturation measures now need to be developed in estuaries and existing ones optimized. Numerical simulations contribute to the evaluation of such strategies.*

*This paper summarizes the current capabilities and performance of a newly developed three-dimensional numerical model for simulating fluid mud dynamics in estuarine systems. Further possible developments of the numerical model are presented. Important aspects are the interaction of rheology and turbulence in estuaries and the influence of biological parameters.*

**Keywords**

*fluid mud, three-dimensional numerical model, cohesive sediment suspension, rheology, isopycnal model*

**Inhalt**

|   |                                                                                                   |     |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1 | Einleitung .....                                                                                  | 502 |
| 2 | Konzeptionelles Modell für die Simulation der Flüssigschlickdynamik .....                         | 503 |
| 3 | Erkenntnisgewinn und Anwendungen des dreidimensionalen numerischen<br>Flüssigschlickmodells ..... | 505 |
| 4 | Aussichten .....                                                                                  | 507 |
| 5 | Schriftenverzeichnis .....                                                                        | 510 |

**1 Einleitung**

Mit dem fortschreitenden Ausbau der Fahrrinnen und Häfen in den letzten Jahrzehnten hat die Verschlickung in Ästuarsystemen zugenommen. Während kohäsive Schwebstoffe in Gewässern durch turbulente Strömungen transportiert werden, sinken die Partikel in strömungsberuhigten Gebieten und in Phasen beruhigter Strömung, z. B. während der Kenterungsphasen in Tidenströmungen, zu Boden und akkumulieren dort. Bei ausreichendem Schwebstoffangebot bildet sich Flüssigschlick. Flüssigschlick beeinträchtigt die Schifffahrt und reduziert die Gewässergüte. Die Verschlickung der Gewässer führt zu einem erhöhten Unterhaltungsaufwand für die Seeschiffahrtsstraßen, z. B. im Emsästuar.

Flüssigschlick (*fluid mud, high-concentration mud suspension*) ist eine Suspension, die aus mineralischen Partikeln, organischen Stoffen, Wasser und teilweise auch geringen Anteilen von Gasen besteht. Auf Grund der kohäsiven Eigenschaften von Tonpartikeln ist der Tonanteil maßgeblich für das spezifische Fließverhalten des Flüssigschlicks verantwortlich. Die Bezeichnung Flüssigschlick beschreibt einen Zustand, in dem der Schlick trotz sehr hoher Schwebstoffkonzentrationen (im Bereich von einigen 10 g/l) fließfähig ist. Das Fließverhalten von Flüssigschlick ist abhängig vom Scherzustand und kann als viskoelastisch mit einer Fließgrenze (*yield stress*) beschrieben werden. Im Vergleich dazu

wird Wasser als ein ideal-viskoses Newtonsches Fluid charakterisiert. Flüssigschlick als nicht-Newtonsches Fluid unterliegt demnach einer anderen Rheologie als reinem Wasser.

Daher ist ein vertieftes Prozessverständnis über die Entstehung, Entwicklung und den Transport sowie die Beschreibung des rheologischen Fließverhaltens von Flüssigschlick für die Beurteilung, Planung und Optimierung von Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen und Maßnahmen zur Verminderung der Verschlickung erforderlich. Heute erfolgen die notwendigen detaillierten Untersuchungen und Prognosen zum Systemverhalten eines Gewässers mit Unterstützung numerischer Modelle. Vor diesem Hintergrund wurde das Forschungsvorhaben MudSim initiiert (03KIS66/67, zur Förderung vorgeschlagen durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), gefördert durch das Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)). In den letzten Jahren wurde in Zusammenarbeit zwischen der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und Prof. A. Malcherek, Universität der Bundeswehr München, ein numerisches Modell zur Simulation der Flüssigschlickdynamik (MudSim) entwickelt. Hierfür wurde ein hydrodynamisches numerisches Modell in isopyknischen Koordinaten für die Simulation der Flüssigschlickdynamik erweitert. Seitdem wurde das MudSim-Modell von der BAW kontinuierlich weiterentwickelt. Im Folgenden wird das Flüssigschlickmodell kurz dargestellt, anschließend werden Einschätzungen zu künftigen Weiterentwicklungsmöglichkeiten erörtert.

## 2 Konzeptionelles Modell für die Simulation der Flüssigschlickdynamik

Die numerische Modellierung von Ästuaren erfolgt mit dreidimensionalen Modellen, die physikalische Prozesse wie Schwebstofftransport, Salztransport, dichteinduzierte Strömungen, Turbulenz usw. berücksichtigen. Diese konventionellen Modelle basieren auf der Annahme eines Newtonschen Fluides. Hochkonzentrierte Schlicksuspensionen verhalten sich jedoch deutlich nicht-Newtonsch, daher war die Entwicklung eines Moduls zur Simulation und Vorhersage der Dynamik von Flüssigschlick erforderlich.

Der Übergangsbereich zwischen einer Flüssigschlickschicht und dem darüber liegenden Wasserkörper weist in der Regel einen starken Dichtegradienten auf. Der Grenzschicht wird als Lutokline bezeichnet. Die beiden Fluidschichten unterscheiden sich stark in ihrem Fließverhalten und interagieren über Scherkräfte in der Grenzfläche. Daher ist ein häufig gewählter Ansatz, den Flüssigschlick als zweidimensionalen tiefengemittelten Layer zu modellieren. Prozesse wie die Entstehung und Resuspension von Flüssigschlick wirken sich in einer Änderung des Dichtegradienten und der Entwicklung eines Mehrschichtensystems aus. Im Emsästuar bilden sich z. B. in der Trübungszone mehrere Meter starke Flüssigschlickschichten, vor allem bei Ebbe, als Resultat der Tideasymmetrie. Dieses Phänomen zeigte sich im Zuge von Naturmessungen im Jahr 2009 (siehe Abb. 1), als mehrlagige Schlicksuspensionsschichten unterschiedlicher Dichte aufgezeichnet wurden.

Um solche Mechanismen besser auflösen zu können, wurde in diesem Projekt für das numerische Modell ein isopyknischer Ansatz (Isopyknen – Schichten konstanter Dichte) verfolgt, der Schlicksuspensionen durch Schichten konstanter Dichte dreidimensional auflöst. Dieser Ansatz hat sich als vielversprechend erwiesen. Für die Simulation der Flüssigschlickdynamik erfolgte die Weiterentwicklung eines bestehenden dreidimensionalen isopyknischen Modellansatzes nach CASULLI (1997). Das weiterentwickelte Flüssigschlick-Modell nennt sich *MudSim*. Das numerische Verfahren zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Die isopyknische Diskretisierung erlaubt eine dreidimensionale Auflösung des Flüssigschlickkörpers mit geringem Diskretisierungs- und Rechenaufwand.
- Der isopyknische Ansatz löst die Dichteschichtung und das Geschwindigkeitsprofil innerhalb des Flüssigschlickkörpers auf.
- Die Schichtdicken variieren mit dem Übergang in andere Suspensionszustände; dies ermöglicht die Simulation von Bildung, Resuspension, Absinken und des advektiven und gravitationellen Transports des Flüssigschlicks.
- Die numerische Umsetzung basiert auf der numerischen Diskretisierung in vertikaler Richtung über  $\rho$ -Schichten, in horizontaler Richtung über das unstrukturierte Gitter und über die Zeit.
- Die Interaktion der isopyknischen Schichten erfolgt auf Basis der Impulsübertragung, des vertikalen Massentransfers und über Scherkräfte an der Grenzfläche der Isopyknen.

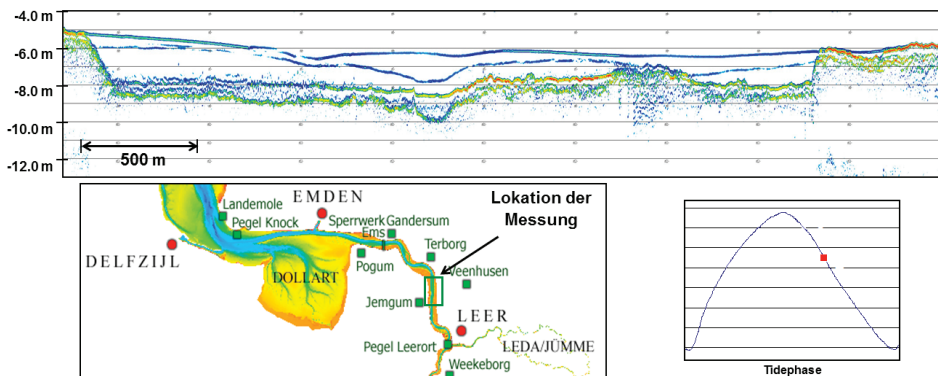


Abbildung 1: Mehrschichtiges Flüssigschlickssystem während der Ebbphase mittels Sediment-Echolotpeilung (parametrischer Sediment-Sub-Bottom-Profilier für Flachwasser) aufgezeichnet. Der Längsabschnitt befindet sich in der Ems zwischen Terborg und Leer. Die blauen Linien markieren starke Dichtegradienten, der gelb-rote Horizont markiert die feste Sohle. Die Naturmessungen wurden im Juli 2009 von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) durchgeführt.

Das Verfahren wurde durch eine Approximation für die inneren Spannungen eines nicht-Newtonschen Fluides erweitert und ein parametrisierter Ansatz zur Beschreibung des spezifischen rheologischen Verhaltens von Flüssigschlick integriert.

Es wird eine Methode für die Integration nicht-Newtonschen Fließverhaltens in ein numerisches Modell basierend auf den Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben. Im Modell wird das nicht-Newtonsche Fließen des Flüssigschlicks durch die Einführung der rheologischen Viskosität realisiert. Die rheologische Viskosität parametrisiert die Rheologie in Abhängigkeit vom Scherzustand und der Feststoffkonzentration. Das rheologische Modell beschreibt das Aufbrechen von Aggregaten in einer Flüssigschlick-Suspension und ihre Neubildung (beschrieben in MALCHEREK und CHA (2011) sowie in WEHR (2012)). Statt als Konstante – wie die molekulare Viskosität – geht die rheologische Viskosität nun als zeitabhängiger und prozessbeschreibender Parameter in die Modellierung ein. Auf diese Weise wird es möglich, unterschiedliche rheologische Modelle anzuwenden. Die innere Reibung und die inneren Scherspannungen an den

Grenzflächen sind nun abhängig vom rheologischen Verhalten der Flüssigschlicksuspension und werden so in der numerischen Simulation berücksichtigt.

Die Rheologie von Flüssigschlick wird als viskoplastisches, scherverdünnendes Verhalten durch Anwendung eines parametrisierten Worrall-Tuliani-Modells beschrieben (WORRALL und TULIANI 1964; KNOCH und MALCHEREK 2011; MALCHEREK und CHA 2011). Dieses Modell berücksichtigt eine Fließgrenze und das Aufbrechen und die Neubildung mikroskopischer Strukturen (Aggregate kohäsiver Sedimente). Diese Parameter werden in Abhängigkeit von der Scherkraft und der Feststoffvolumenkonzentration berechnet. Mit diesem Ansatz wird die gesamte Wassersäule modelliert, da er nicht nur das nicht-Newtonsche Verhalten hochkonzentrierter Suspensionen beschreibt, sondern auch das Newtonsche Verhalten schwach konzentrierter Suspensionen und klaren Wassers. Das scherverdünnende Verhalten wurde phänomenologisch untersucht und konnte im Rahmen einer Studie des Abschnitts Rhede bis zum Wehr Herbrum im Emsästuar reproduziert werden – hier wurde eine geschichtete Strömung in einem tidebeeinflussten System untersucht (WEHR 2012; WEHR und MALCHEREK 2012). Der Einfluss der Rheologie auf das Fließverhalten hochkonzentrierter Suspensionen wurde im Rahmen einer Systemstudie des Fließens auf einer schiefen Ebene analysiert (WEHR 2012; WEHR und MALCHEREK 2012). Dieser Effekt wurde mit dem Einfluss durch rein gravitationellem Antrieb der Dichtedifferenzen verglichen, der sich als der dominante Prozess für diesen Testfall erwiesen hat.

Darüber hinaus werden wesentliche Teilprozesse des Flüssigschlicktransports durch Parametrisierungen im MudSim-Modell berücksichtigt. Vertikale Transportprozesse, die zur Bildung und Resuspension von Flüssigschlick führen, sind vor allem behindertes Absinken (*hindered settling*) und Entrainment. Dies erfordert eine Variation der Schichtdicke der Dichteschichten über die Zeit und in Abhängigkeit von den jeweils vorliegenden Massentransportraten.

Die Methode zur Simulation der Dynamik von Flüssigschlick wird in WEHR (2012) und in WEHR und MALCHEREK (2012) ausführlicher vorgestellt.

### **3 Erkenntnisgewinn und Anwendungen des dreidimensionalen numerischen Flüssigschlickmodells**

Die Dynamik von Flüssigschlickten unter dem Einfluss der Tide wurde anhand von zwei Modellgebieten untersucht: dem Emsästuar und dem Weserästuar (WEHR (2012) und WEHR und MALCHEREK (2012)). Im Folgenden sind die Ergebnisse beschrieben:

- Flüssigschlickbildung, advektiver und gravitativer Transport sowie Resuspension sind periodische Prozesse in Tidesystemen.
- Eine stark geschichtete Strömung ergibt sich bei Kenterung und während des Ebbestroms in der Schifffahrtsrinne.
- Die rheologischen Viskositäten, berechnet als Funktion der Scherrate und der Dichte, ergeben plausible Resultate und beeinflussen die Geschwindigkeiten der geschichteten Strömung.
- Der qualitative Vergleich der simulierten Flüssigschlickbildung mit der gemessenen Entwicklung der Lutokline in den Flussabschnitten der Ems und der Weser zeigt ähnliche Ergebnisse.

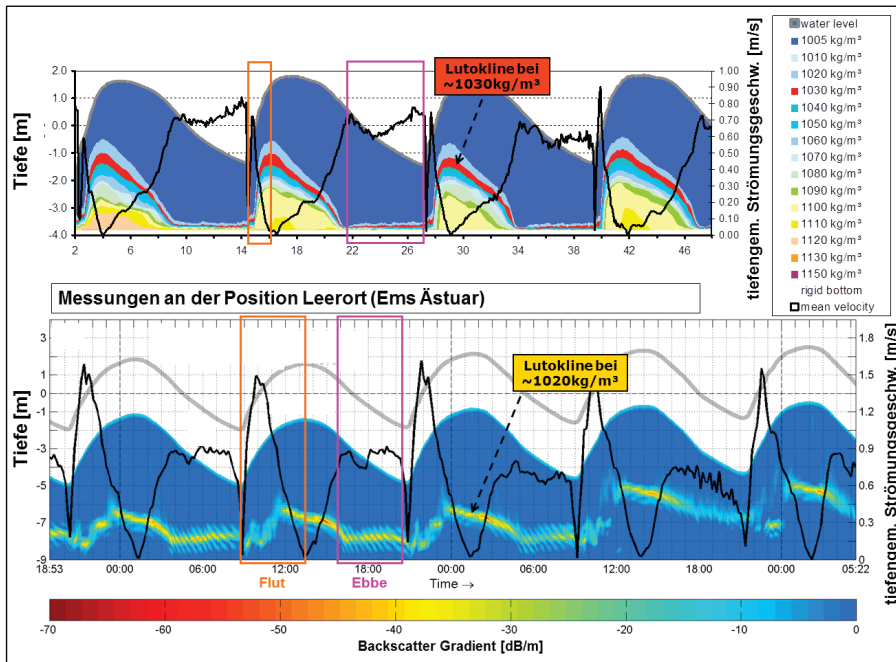


Abbildung 2: Tidedynamik der Lutokline – Vergleich zwischen Simulation (Diagramm oben, Simulation (1)) und Naturmessungen basierend auf 300 kHz ADCP-Messungen (Diagramm unten). Die der Lutokline entsprechende Dichte beträgt in der Simulation  $1030 \text{ kg/m}^3$ . In den Messungen markiert ein hoher Backscatter-Gradient die Lutokline. Der Wasserstand ist in Grau dargestellt, die tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit in Schwarz. Es sei angemerkt, dass sich die simulierten und gemessenen Daten auf unterschiedliche Positionen und unterschiedliche hydrodynamische Verhältnisse beziehen. Die charakteristische Entwicklung der Lutokline zeigt jedoch eine hohe Ähnlichkeit (Diagramm der Messungen mit freundlicher Genehmigung von WANG (2010)).

Der letztere Aspekt wird im Folgenden als kurzes repräsentatives Ergebnis der Simulation der Dynamik von Flüssigschlick mit dem MudSim-Modell vorgestellt. Das numerische Modell MudSim wurde auf den Flussabschnitt zwischen Rhede und dem Wehr Herbrum angewendet. Eine ausführliche Beschreibung der Modellanwendung und ihrer Ergebnisse findet sich in WEHR und MALCHEREK (2012). Ein charakteristisches Ergebnis der dreidimensionalen Simulation mit 16 Dichteschichten wird dargestellt. Der Sedimenttransport in dieser Region geprägt durch Schlicksuspensionen. Feine Sedimente werden hauptsächlich über das *Tidal Pumping* in diese Region transportiert. Flüssigschlicktransport und -entwicklung unter dem Einfluss von Tidenströmungen wurden qualitativ über den Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messungen der Lutokline nach WANG (2010) analysiert (siehe Darstellung in Abb. 2). Die Messungen wurden über mehrere Tidezyklen an einem bestimmten Ort in der Trübungszone des Emsästuars (Leerort) durchgeführt. Die Simulationsergebnisse beziehen sich auf eine Position zwischen Rhede und Herbrum. Es werden nicht nur verschiedene Orte betrachtet, auch die hydrodynamischen Verhältnisse sind hier unterschiedlich – so ist nur ein phänomenologischer Vergleich möglich. Jedoch zeigen sowohl die Simulation als auch die Naturmessungen die typische asymmetrische Tide mit starken Flutströmungen, einer langen Stauwasserdauer zwischen Flut- und



Ebbestrom sowie einer ebenfalls langen Ebbestromphase. Die Messungen der Lutokline ergeben sich durch die Auswertung des Backscatter-Signals des ADCP-Profilers. Ein hoher Backscatter-Gradient verweist auf einen hohen Dichtegradienten im Wasserkörper.

Die Naturmessungen von WANG (2010) ergaben einen Schwebstoffgehalt von circa  $30 \text{ kg/m}^3$  (Dichte  $\sim 1020 \text{ kg/m}^3$ ) knapp unterhalb der Lutokline bei Flutstromkenterung. Zur Sohle hin erhöht sich die Konzentration. Die simulierte Dichteschichtung entspricht den Höhenlagen der oberen Grenzfläche der einzelnen Isopyknen. Die Lutokline ist definiert als der Übergang zwischen Newtonschem und nicht-Newtonschem Verhalten und kennzeichnet einen starken Dichtesprung. Dies entspricht der Schicht mit einer Dichte von  $1030 \text{ kg/m}^3$  in der Simulation. Sie ist in der Grafik rot markiert.

Während der Flutphase wird die Flüssigschlicksuspension in den Wasserkörper eingetragen (Entrainment). Die Naturmessungen zeigen hier geringe Backscatter-Gradienten über die gesamte Wassersäule. Dieser Durchmischungsprozess zeigt sich im Modell durch einen raschen Anstieg der Schichtdicken (Höhenlagen) der Schlicksuspensionen. Die wachsenden Schichtdicken resultieren aus einer Durchmischung von Schichten höherer mit Schichten geringerer Konzentration infolge von Entrainment und horizontalem Transport. So zeigt sich ein hochstabiles geschichtetes System sowohl in den Messungen als auch in der Simulation während der Kenterung. Der Flüssigschlick wird mit der Ebbeströmung stromabwärts getragen, wodurch sich die Höhenlage der Lutokline verringert. Mit steigender Ebbestromgeschwindigkeit verringert sich die Höhenlage der Lutokline sowohl in der Simulation als auch in der Naturmessung. Gleichzeitig verschwindet die scharfe Grenze zwischen dem Flüssigschlick und dem Wasserkörper. Die Verläufe der simulierten und gemessenen Lutoklinen sind sehr ähnlich und verweisen auf vergleichbare Reaktionen auf die Tideströmungen, auch wenn der Durchmischungsprozess in den Simulationen verstärkt werden sollte.

Diese Modellanwendungen zeigen, dass sich der entwickelte numerische Modellansatz für eine Simulation der dreidimensionalen Flüssigschlickdynamik eignet. Das entwickelte numerische Modell ist in der Lage, die Dynamik von Flüssigschlick in Systemen wie etwa Hafenbecken oder Flussabschnitten, die durch das Fließverhalten hochkonzentrierter Suspensionen und Flüssigschlick dominiert werden, zu simulieren. Mit ihrem Beitrag können solche Simulationen klassische dreidimensionale hydrodynamische und morphodynamische Simulationen von Ästuarsystemen ergänzen und die Bewertung des Sedimenttransports und geeigneter Unterhaltungsstrategien unterstützen.

#### 4 Aussichten

Das vorgestellte numerische Modell verwendet eine geeignete Auflösung des Flüssigschlickkörpers über isopyknische Schichten. Jede isopyknische Schicht repräsentiert ein einphasiges Fluid bzw. Suspension mit einer spezifischen Feststoffkonzentration und spezifischen rheologischen Eigenschaften. Die isopyknische Schicht kann, je nach Transportrate und der Entwicklung der kohäsiven Schlicksuspensionen, sehr dünn werden oder sich gänzlich auf eine Dicke von 0 reduzieren.

In den vorgestellten Modellanwendungen in WEHR (2012) und WEHR und MALCHEREK (2012) wird das dreidimensionale isopyknische Modell auf die gesamte Wassersäule von der konsolidierten Sohle bis zur freien Wasseroberfläche angewendet. Für die Simulation von hochkonzentrierten Schlickschichten liefert das Verfahren

plausible Ergebnisse, ist jedoch durch den numerischen Ansatz auf eine stabile Schichtung der Strömung begrenzt. Diese Annahme trifft jedoch bei hochturbulenten Strömungen mit Schwebstoffen nicht immer zu. Insbesondere die Präsenz von Schwebstofftransport und barokline Prozesse können in Ästuaren zu instabilen Schichtungen führen. Weitere Untersuchungen zur Simulation des geringkonzentrierten Wasserkörpers sind erforderlich, um eine umfassende Modellierung von Ästuarsystemen zu ermöglichen. Im Folgenden wird eine Möglichkeit erörtert, zu einem ausgereifteren Modell des Wasserkörpers zu gelangen.

Eine vorstellbare Lösung liegt in der Kopplung des isopyknischen Modells mit einem bestehenden hydrodynamischen Modell, z. B. UnTRIM (CASULLI und WALTERS 2000; CASULLI und LANG 2004), Telemac (HERVOUET und BATES 2000; ELECTRICITÉ DE FRANCE 2000) oder Delft3D (LESSER et al. 2004; GERRITSEN et al. 2007). Bei einer solchen Kopplung würde das isopyknische numerische Modell als Modul zur Simulation des Flüssigschlickkörpers fungieren. Die Simulation von Schwebstoff- und Salztransport erfolgt mittels des hydrodynamischen Modells wie beispielsweise in WEILBEER (2014). Das isopyknische Flüssigschlickmodul würde dann im Falle einer Flüssigschlickbildung aktiv werden, wenn die Grenze vom Newtonschen zum nicht-Newtonschen Fließverhalten oder eine definierte Schlickkonzentration überschritten ist. Das Modul würde nur in Modellgebieten aktiviert werden, in denen kohäsives Sediment akkumuliert, so dass sich der Rechenaufwand für große Modellgebiete reduziert, die unterschiedliche Transportregime aufweisen so wie in Ästuaren. Dieser Ansatz erfordert Weiterentwicklungen, zusätzliche Forschung und Softwareentwicklung zum Zwecke der umfassenden Modellierung von Ästuarsystemen. Die Kommunikation zwischen den Modellen wird weitere Untersuchungen sowohl hinsichtlich der Softwareentwicklung als auch hinsichtlich der Beschreibung physikalischer Vorgänge benötigen. Hierzu gehört u. a. der im Folgenden beschriebene Gesichtspunkt.

Bisher konzentrierten sich die Entwicklungen auf die Reibung an den Grenzflächen und die innere Reibung resultierend aus dem rheologischen Verhalten. Innere Scherspannungen unterliegen jedoch auch einer Beeinflussung durch Turbulenz.

In der Natur wird das Fließen des Flüssigschlicks laminar, wenn die Turbulenz auf Grund der Dichteschichtung zerfällt. Andererseits geht mit abnehmender Schlickkonzentration im Wasserkörper das rheologische Verhalten von nicht-Newtonsch zu Newtonsch über und ermöglicht die Erzeugung von Turbulenz. Es entsteht eine Wechselwirkung zwischen Turbulenz und Schwebstoffen durch Turbulenzdämpfung und Auftriebswirkung, die wiederum die Sinkgeschwindigkeit beeinflussen. In den hochkonzentrierten geschichteten Bereichen zeichnet sich das Fließverhalten durch rheologische Viskosität aus, wohingegen in gut durchmischten Bereichen mit geringer Konzentration die turbulente Viskosität vorherrscht. Rheologie und Turbulenz werden mit einem ähnlichen konzeptionellen Verfahren modelliert wie in WEHR (2012) beschrieben. Sie werden als Viskosität berücksichtigt und resultieren in einer Verlangsamung der mittleren Geschwindigkeit mit steigenden Viskositäten (innere Reibung). Physikalisch wirken sie jedoch entgegengesetzt. Während mit zunehmender rheologischer Viskosität ein laminares und geschichtetes Fließverhalten entsteht, verstärkt hingegen eine Erhöhung der turbulenten Viskosität die turbulente Vermischung und kann instabile Schichtungen verursachen. Entsprechend wird der Zusammenhang zwischen rheologischer und turbulenter Viskosität für eine verbesserte Modellierung von Flüssigschlick- und Schwebstoff-



transport von hoher Bedeutung sein. Dabei ist dem Übergangsbereich zwischen Flüssigschlick und geringkonzentrierter Suspension sowie dem Bildungsprozess und der Resuspension von Flüssigschlick besondere Aufmerksamkeit zu widmen, da beide Größen während der Resuspension und des Entrainments höhere Größenordnungen annehmen können. Ein auf Viskosität basierender umfassender Ansatz sollte auf einer Kombination von Rheologie- und Turbulenzmodellierung beruhen und Feststoffkonzentration, Scherzustand und strukturelle Mechanismen (z. B. Flokkulation) für den gesamten Wasserkörper berücksichtigen.

Eine Verbesserung des Turbulenzmodells wird auch das Entrainment von Flüssigschlick betreffen, welches vorwiegend durch turbulente Scherspannungen an der Grenzfläche induziert wird. Ein weiterer Aspekt, dessen Untersuchung sich anbietet, ist der Einfluss von großflächigen Flüssigschlickbildungen beträchtlicher Schichtdicke auf die innere Reibung in Ästuarsystemen. In Phasen starker Schichtung ist die Turbulenz gedämpft und die innere Reibung wird durch die rheologische Viskosität geprägt. Das scherverdünnende Verhalten des Flüssigschlicks kann dann zu relativ geringen rheologischen Viskositäten führen, sobald der Flüssigschlick sich mit der Tideströmung bewegt. Im Vergleich zu den Größenordnungen der rheologischen Viskositäten können turbulente Viskositäten in einem Turbulenz-dominierten System deutlich größere Ausprägungen annehmen. Dieser Zusammenhang und die reduzierte Sohlreibung für den oberhalb des Flüssigschlickkörpers fließenden Wasserkörpers kann einen erhöhten Tidenhub in Ästuaren zur Folge haben (siehe Erläuterungen zur Tidedynamik in MALCHEREK (2010)).

Weitere prozessbasierte Verbesserungen und Validierung des Flüssigschlickmodells werden zusätzliche Vergleiche mit Laboruntersuchungen und Naturmessungen erfordern. Für die Naturmessungen der Entwicklung von Flüssigschlick sind nicht nur Aufzeichnungen der Bewegung der Lutokline, sondern auch der Dichteschichtung unterhalb der Lutokline sowie der Geschwindigkeitsverteilung innerhalb des Flüssigschlickkörpers nötig. Diese Arten von Messungen für hochdynamische Systeme sind Gegenstand laufender Forschung, da Messungen in hochkonzentrierten Suspensionen schwer durchführbar sind. Die Naturmessungen sollten es ermöglichen, spezifische beobachtete Phänomene mit physikalischen Prozessen in Beziehung zu setzen. Physikalische Prozesse in tidebeeinflussten Systemen sind stets im Zusammenhang mit dem Tidezyklus zu sehen, und daher besteht die Notwendigkeit, kontinuierliche Informationen innerhalb des Tidesystems zu erfassen (mindestens über einen vollständigen Tidezyklus).

Das charakteristische Fließverhalten von Flüssigschlick kann reproduziert werden, indem eine rein aus kohäsiven Sedimenten und Wasser bestehende Schlicksuspension angenommen wird, wie im hier vorliegenden Modell gezeigt wurde. Es gibt jedoch mehrere Aspekte, aus denen wir lernen und ein besseres Verständnis des Fließverhaltens unter unterschiedlichen Bedingungen gewinnen können. Ein wichtiger Punkt ist der Einfluss organischer Bestandteile und biologischer Aktivität auf die Bildung und das Fließverhalten von Flüssigschlick. Erste Untersuchungen zur Simulation biochemischer Wechselwirkungen in Ästuarsystemen wurden im Rahmen des BAW-Projekts „Interaktion von Sedimenttransport und Wasserqualität in dreidimensionalen Ästuarmodellen“ mit der Aussicht auf weitere Forschung zu Wechselwirkungen zwischen biologischer Aktivität und Sedimenttransport durchgeführt.

## 5 Schriftenverzeichnis

- CASULLI, V.: Numerical simulation of three-dimensional free surface flow in isopycnal co-ordinates. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 25, 6, 645-658. doi: 10.1002/(SICI)1097-0363(19970930)25:6<645:AID-FLD579>3.0.CO;2-L, 1997.
- CASULLI, V. and LANG, G.: Mathematical model UnTRIM, Validation Document 1.0. The Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW), Hamburg, Germany, 2004.  
www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische\_verfahren/pdf/vd-untrim-2004.pdf
- CASULLI, V. and WALTERS, R. A.: An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 32, 3, 331-348. doi: 10.1002/(SICI)1097-0363(20000215)32:3<331:AID-FLD941>3.0.CO;2-C, 2000.
- ELECTRICITÉ DE FRANCE: Telemac-2D validation document version 5.0. Note technique, Electricité de France, Direction des Etudes et Recherches, Chatou Cedex, France, 2000.
- GERRITSEN, H.; DE GOEDE, E. D.; PLATZEK, F. W.; GENSEBERGER, M; VAN KESTER, J. A. TH. M. and UITTENBOGAARD, R. E.: Validation document Delft3D-FLOW - a software system for 3D flow simulations. Report X0356, M3470, Delft Hydraulics, The Netherlands, 2007.
- HERVOUET, J. M. and BATES, P.: The TELEMAC modelling system. *Hydrological Processes*, Vol. 14, 13, 2209-2210. doi: 10.1002/1099-1085(200009)14:13<2209:AID-HYP23>3.0.CO;2-6, 2000.
- KNOCH, D. and MALCHEREK, A.: A numerical model for simulation of fluid mud with different rheological behaviors. *Ocean Dynamics*, Vol. 61, 2-3, 245-256. doi: 10.1007/s10236-010-0327-x, 2011.
- LESSER, G. R.; ROELVINK, J. A.; VAN KESTER, J. A. T. M. and STELLING, G. S.: Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, Vol. 51, 8-9, 883-915. doi: 10.1016/j.coastaleng.2004.07.014, 2004.
- MALCHEREK, A.: Gezeiten und Wellen - Die Hydromechanik der Küstengewässer. Praxis. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, Germany, 2010.
- MALCHEREK, A. und CHA, H.: Zur Rheologie von Flüssigschlick: Experimentelle Untersuchungen und theoretische Ansätze - Projektbericht. Mitteilungen 111, University of the German Armed Forces, Institute of Hydro Science, Munich, Germany, 2011.
- MEHTA, A.; SAMSAMI, F.; KHARE, Y. and SAHIN, C.: Fluid mud properties in nautical depth estimation." *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, Vol. 140, 2, 210-222, 2014.
- WANG, L.: Tide Driven Dynamics of Subaqueous Fluid Mud Layers in Turbidity Maximum Zones of German Estuaries, Dissertation, Fachbereich Geowissenschaften, University of Bremen, Germany, 2010.
- WEHR, D.: An isopycnal numerical model for the simulation of fluid mud dynamics, PhD-thesis, Mitteilungen 115, University of the German Armed Forces, Institute of Hydro Science, Munich, Germany, 2012.

- WEHR, D. and MALCHEREK, A.: Numerical simulation of fluid mud dynamics – The isopycnal model MudSim. *Die Küste*, 79, 2012.
- WEILBEER, H.: Sediment transport and sediment management in the Elbe estuary. *Die Küste*, 81, 2014.
- WORRALL, W. E. and TULIANI, S.: Viscosity changes during the ageing of clay-water suspensions. *Trans British Ceramic Society*, Vol. 63, 167-185, 1964.