

**IN-SITU MESSUNGEN UND NUMERISCHE SIMULATION  
DES VERHALTENS VON FLÜSSIGSCHLICK**

von

Andreas Wurpts<sup>1</sup>

**ABSTRACT**

Fluid mud occurs at most river mouths where the overall hydrodynamic situation aids the culmination of cohesive fines like usually the turbidity zone does. Fines predominantly settle in calm side areas as well as harbors and over deepened parts of the fairway. The presence of fluid mud can affect navigation by means of reduced maneuverability and increased propulsion forces needed. The presence of fluid mud also implements the need for different methods of navigable bottom detection, since already weak and almost fluent layers show up very clear at acoustic echo soundings. The resulting overestimation of material to be dredged by means of fairway maintenance can unnecessarily increase maintenance costs. Fluid mud consists of mainly mineral fines, supplemented by a smaller fraction of organic matter and microorganisms that form a network. The aforementioned mixture is exposed to transport, erosion and deposition processes on different spatial and temporal scales. Its different cohesive contents lead to complex rheological behavior with shear thinning and time dependency. Mainly caused by biological impacts the long term state of fluid mud in sheltered areas can be characterized by slow consolidation combined with low density and strong mechanical strength at the same time. Knowledge of the time dependent and very variable properties of fluid mud can help to improve the treatment of harbors, rivers, and fairways where fluid mud is present, and therefore help to reduce costs and increases the safety of navigational operations. Numerical modeling as a tool for decision support also still lacks functionality in order to correctly predict flow- and sediment dynamics in estuarine waters. This paper gives a short overview on the research activities in the field of fluid mud measurements and numerical model development currently conducted at the Franzius-Institut.

---

<sup>1</sup> Dr.-Ing., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover

## 1. EINLEITUNG

Aufgrund der schnellen Entwicklung der Schiffsgrößen der internationalen Seeschifffahrt und der ständig steigenden Tiefgänge in den letzten Jahrzehnten sind die ausreichenden Wassertiefen im Anfahrtsweg der Seehäfen an der deutschen Nordseeküste ein wesentlicher Standortfaktor geworden, der nur durch fortwährende Vertiefungen und nachfolgende Unterhaltung der Zufahrtswege dauerhaft erhalten werden kann. So fallen von den etwa 45 Mio m<sup>3</sup> Baggergut, die in Deutschland in den letzten Jahren jährlich durch Naßbaggerungen bewegt werden, etwa 90% im Bereich der Nordseeküste und der zugehörigen Tideflüsse an. Insbesondere im Süß-Salzwasser-Mischbereich, der Brackwasserzone, entsteht permanent ein spezielles, teilweise organisches Sediment, nämlich der Schlick. Dieser bildet im Wasserkörper Flocken, welche eine sehr geringe und zudem mit der lokalen Sedimentkonzentration und den lokalen Strömungsbedingungen variierende Sinkgeschwindigkeit aufweisen. Hierdurch setzen sich diese insbesondere in strömungsberuhigten Zonen und zu den Kenterzeiten ab. Die Sedimentkonzentration an der Sohle kann dabei so hoch werden, dass man von Flüssigschlick (fluid mud) spricht, der deutlich andere Fließeigenschaften aufweist, als das darüber befindliche Wasser.

Welcher Anteil der Baggeraufwendungen auf Fluid Mud entfällt, ist nicht genau bekannt, einen Eindruck vermitteln jedoch die Erfahrungen aus dem Emdener Hafen, wo bis zur Etablierung der heutigen in situ Unterhaltungsstrategie jährlich 4,0 Mio m<sup>3</sup> vorrangig aus Fluid Mud bestehendes Baggergut den Häfen entnommen wurden.

Um die Unterhaltungskosten an den Tideflüssen zu minimieren, muß die Dynamik von Flüssigschlick berechenbar sein. Die hydrodynamische Situation in den sogenannten teildurchmischten Ästuaren der deutschen Nordseeküste wird geprägt durch die komplexen Interaktionen der gezeiteninduzierten Strömungen mit Dichte- und Schichtungseffekten, die auf räumlich sehr unterschiedlichen Skalen ablaufen. Der dominanteste Einfluß auf die Wasserbewegung ist die gezeiteninduzierte Bewegung des Wasserkörpers, die aus den zyklischen Wasserstandsschwankungen am seeseitigen Rand des Ästuars resultiert. Ein anderer wesentlicher Einfluß ergibt sich aus der Einmischung des Oberwasserzuflusses in das salzige Wasser der offenen See und die resultierenden Schichtungseffekte, welche von lokalen Skalen bis hin zur großräumigen baroklinen Zirkulation reichen.

Für den Sedimenttransport im Ästuar resultiert aus der baroklinen Zirkulation die Existenz einer Trübungszone, welcher Sediment sowohl von See als auch von oberstrom zugeführt wird. Die Position der Trübungszone, in der sich Schichten aus Flüssigschlick bilden können, ist u. a. von der Oberwassermenge abhängig.

Die mechanischen Eigenschaften des Flüssigschlicks hängen stark von der Art der bakteriellen Stoffwechselprozesse darin ab. Die zunächst dominierenden aeroben Stoffwechselprozesse gehen hierbei mit zunehmendem Sauerstoffmangel in anaerobe Prozesse über. Grundsätzlich weist Flüssigschlick viskos-plastisches Materialverhalten auf, d.h. es ist fließfähig entsprechend einer komplexen Rheologie, die sowohl Scherverflüssigung als auch Thixotropie aufweist. Bezüglich der Schiffbarkeit und des Bewegungsbeginns verfügt Flüssigschlick zudem über eine Fließgrenze. Die beschriebenen mechanischen Eigenschaften sind langfristig (d.h. im Zeitraum von mehreren Wochen und länger) unbedingt im Zusammenhang mit den biologischen Aspekten zu sehen, da diese im erheblichen Maße durch die Stoffwechselprodukte der enthaltenen Mikroorganismen beeinflusst sind: Die durch die aeroben Stoffwechselprozesse und die reduzierte turbulente Durchmischung im Flüssigschlick bewirkte Sauerstoffzehrung führt mit der Zeit zur Umstellung auf anaeroben Stoffwechsel. Dies geht aufgrund der Stoffwechselprodukte mit einer deutlichen Zunahme der

mechanischen Festigkeit des Flüssigschlicks einher und begünstigt letztendlich dessen dauerhafte Konsolidierung. Auch haben die anaeroben Prozesse eine Zunahme des Methangehaltes im sich verfestigenden Flüssigschlick zur Folge, so dass die effektive Dichte des betrachteten Materials auch in diesem Stadium vergleichsweise niedrig bleibt.

## 2. TRANSPORT- UND AUSTAUSCHPROZESSE

Die Dynamik des Flüssigschlicks im Gewässer ist neben dessen eigener Rheologie vor allem eine Folge der Dynamik des Wasserkörpers sowie des komplexen Absetzverhaltens flockenbildender Suspensionen. Die großräumige Dynamik des strömenden Wasserkörpers kommt im Wesentlichen durch die Überlagerung der Tide mit der Einmischung des Süßwassers aus dem Fluss in das Salzwasser der offenen See zustande. Die in der Folge auftretende barokline Zirkulation bewirkt die Bildung einer Trübungszone, welche für die vorrangig in Suspension transportierten Feinsedimente als ‚Fang‘ fungiert, Abbildung 1.

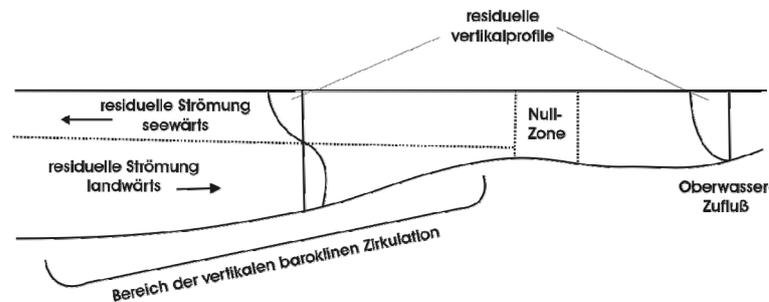


Abbildung 1: Prinzipskizze zur vertikalen baroklinen Zirkulation

Der Effekt, welcher dieser die Tidebewegung überlagernden Zirkulation zugrunde liegt, ist die lokale Dämpfung der turbulenten Mischungsprozesse über Dichtesprünge hinweg. Bezogen auf das suspendierte Sediment erzwingt diese Dämpfung die Ausbildung einer Lutokline, sobald die potentielle Energie des Dichteunterschiedes ausreichend groß gegenüber der durchmischenden Turbulenz der Strömung ist.

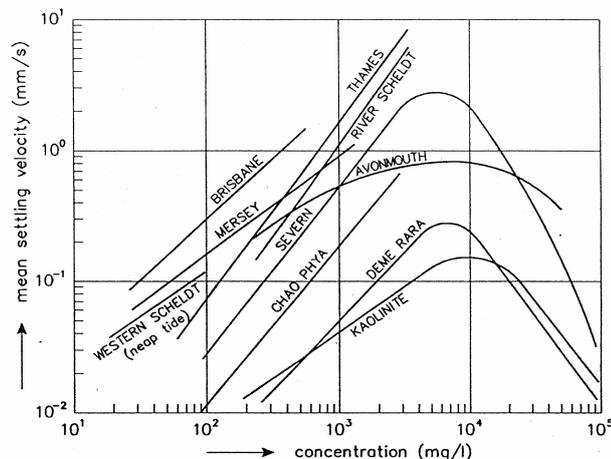


Abbildung 2: Abhängigkeit der Sinkgeschwindigkeit kohäsiver Feinsedimente von der Suspensionskonzentration (van Rijn, 1993)

Die Neigung der in der Suspension befindlichen kohäsiven Feinstpartikel zur Flockenbildung hat zudem eine erhebliche Variabilität der zu beobachtenden effektiven Sinkgeschwindigkeiten der Flocken zur Folge. Das Flockenwachstum wird hierbei durch die Menge der in der Suspension verfügbaren Partikel, und die mechanische Belastbarkeit der Flocken infolge von Turbulenz und der Sinkgeschwindigkeit selbst begrenzt. Die Sinkgeschwindigkeit nimmt hierbei mit zunehmender Flockengröße zu.

In erster Näherung kann die Sinkgeschwindigkeit daher durch eine empirische Formulierung in Abhängigkeit von der Suspensionskonzentration formuliert werden.

Oberhalb einer Grenzkonzentration treten die absinkenden Flocken in gegenseitigen mechanischen Kontakt zueinander, wodurch die Sinkgeschwindigkeit bei weiter steigenden Konzentrationen wieder reduziert wird. Dieser als hindered settling bezeichnete Prozess bewirkt oberhalb der häufig als Gelkonzentration bezeichneten Schwelle, ab welcher ein raumfüllendes Netzwerk aus Flocken und interstitialem Wasser existiert, ein völliges Verschwinden der effektiven Sinkgeschwindigkeit, bzw. kann die Kinematik der Suspension von diesem Punkt an als Kombination aus strukturviskosem Fließen und beginnender Konsolidierung beschrieben werden.

### 3. MESSUNGEN DER FLÜSSIGSCHLICKDYNAMIK

#### 3.1 Räumliche und zeitliche Verteilung

Die räumliche und zeitliche Verteilung von Flüssigschlick im Wasserkörper unterliegt einer erheblichen Variabilität. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass diese in geschützten Seitenbereichen und Vorhäfen geringer ausfällt als in den durchströmten Hauptquerschnitten der Tideflüsse und Ästuare.

Abbildung 3 zeigt einen Vertikalschnitt durch den unteren Teil der Wassersäule im Emden Außenhafen. Dargestellt sind zwei Tiefenhorizonte eines doppelrequenten Echolots, hier 15kHz und 210kHz. Deutlich erkennbar werden die beiden Frequenzen an unterschiedlichen Tiefen innerhalb des Flüssigschlickkörpers reflektiert. Ursächlich hierfür ist die Frequenzabhängigkeit des Reflektionsverhaltens akustischer Impedanzwechsel. Die klassischerweise zur Bestimmung der nautischen Sohle eingesetzte Echolottechnologie ist im Zusammenhang mit Flüssigschlickvorkommen daher nur bedingt einsetzbar, zumal nur eine schwache Korrelation zwischen der Dichte des Flüssigschlicks und dessen akustischer Impedanz existiert.

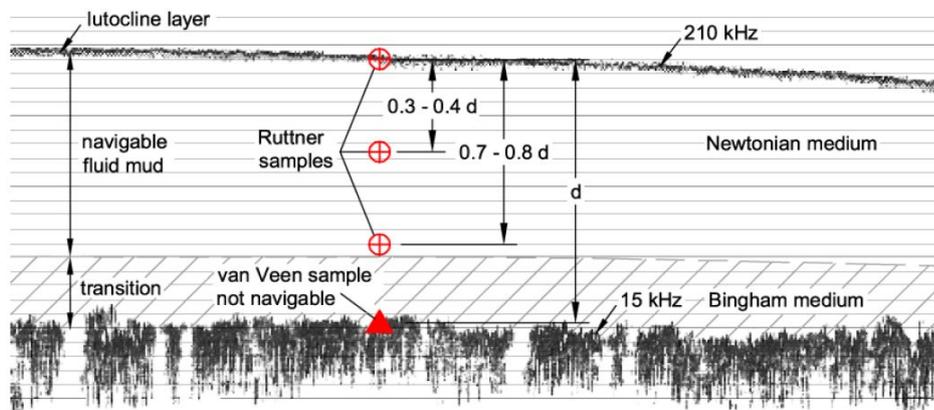
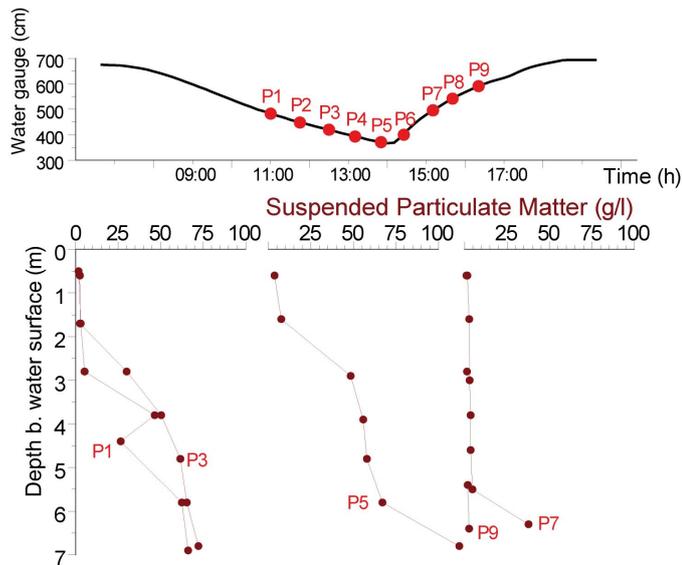


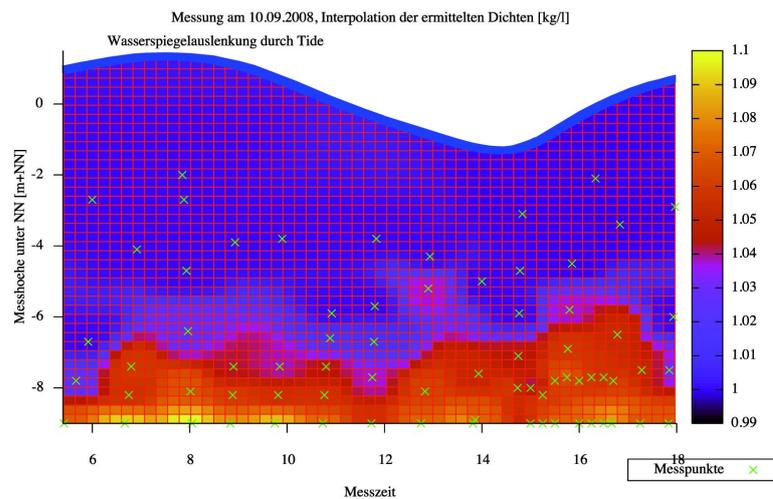
Abbildung 3: Doppelfrequente Echolotpeilung einer Flüssigschlickschicht im Emden Außenhafen (Nasner, 2007)

Aufgrund des vorstehend beschriebenen komplexen Absink- und Transportverhaltens kommt es in den Hauptquerschnitten der Flüssigschlick führenden Flüsse zu deutlich größeren Variationen in der räumlichen und zeitlichen Verteilung des Flüssigschlicks. Die anzutreffenden Zustände variieren zwischen der zeitweise (bezogen auf den Tidezyklus) vollständigen Durchmischung der Wassersäule mit ausgeprägter Schichtung um die Kenterzeitpunkte herum, Abbildung 4, bis hin zu kontinuierlicher Schichtung über den gesamten Tidezyklus, Abbildung 5.



**Abbildung 4: Exemplarische Darstellung gemessener Suspensionskonzentrationen zu verschiedenen Zeitpunkten um die Flutstromkenterung herum (Schöl, 2006)**

Abbildung 5 zeigt exemplarisch den letztgenannten Fall, bei dem eine deutliche Dichteschichtung über den gesamten Tidezyklus vorhanden ist. In diesem Fall kann der Flüssigschlickkörper derart vom oberen Teil der Wassersäule entkoppelt sein, dass dort keine Strömung stattfindet.



**Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf der Flüssigschlickschicht über einen Tidezyklus im Hauptquerschnitt der Ems (Zorndt, 2009)**

### 3.2 Zusammensetzung von Flüssigschlick

Flüssigschlick besteht im Wesentlichen aus sehr feinen (im Bereich der Tonfraktion) mineralischen Partikeln mit kohäsiven Eigenschaften infolge von elektrostatischen Wechselwirkungen. Abbildung 6 zeigt, dass die grundsätzliche Zusammensetzung zwischen verschiedenen Vorhäfen nur unwesentlich variiert. Der Großteil des Materials setzt sich demnach aus anorganischen Lehm und Tonfraktionen zusammen.

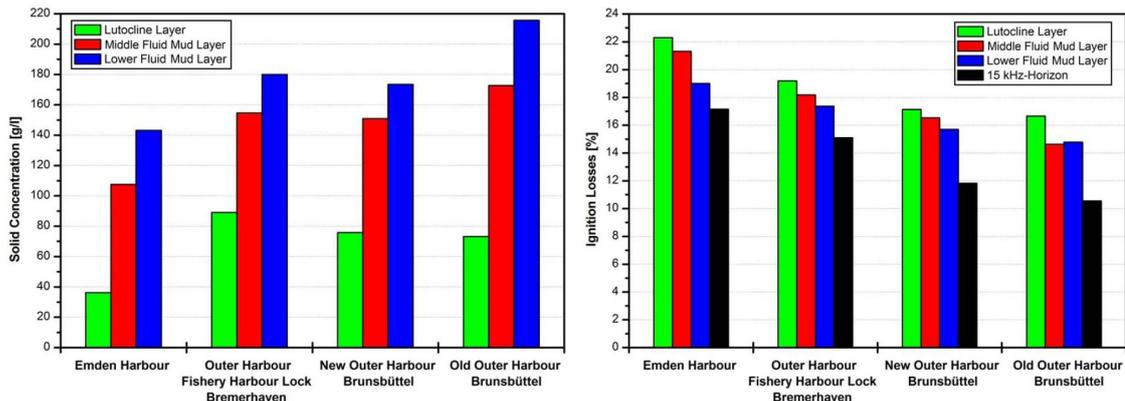


Abbildung 6: Konzentration und organischer Anteil von Flüssigschlickproben für verschiedene Schleusenvorhäfen (Nasner, 2007)

Es zeigt sich gleichwohl, dass der organische Anteil in der Suspension höher ist als in den unteren Lagen des Flüssigschlicks mit höherer Konzentration.

### 3.3 Rheologische Eigenschaften

Suspensionskonzentrationen in der Größenordnung der Gelkonzentration und höher weisen zunehmend eine Beeinflussung der fluidmechanischen Eigenschaften durch die enthaltenen Aggregate aus Sediment auf. Als Folge stellen sich mit zunehmender Konzentration strukturviskose Eigenschaften ein. Die für niedrige Suspensionskonzentrationen vorherrschenden Newtonschen Fließeigenschaften weichen in diesem Fall einer komplexeren Rheologie mit Fließgrenze, Scherverflüssigung und Thixotropie.

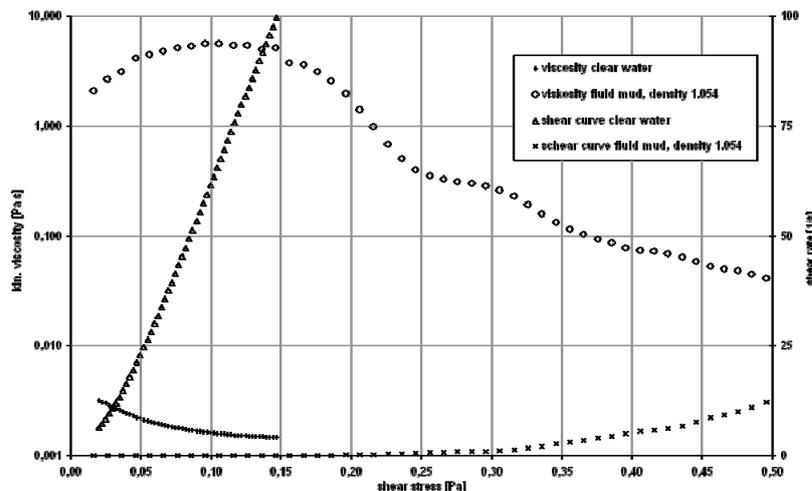
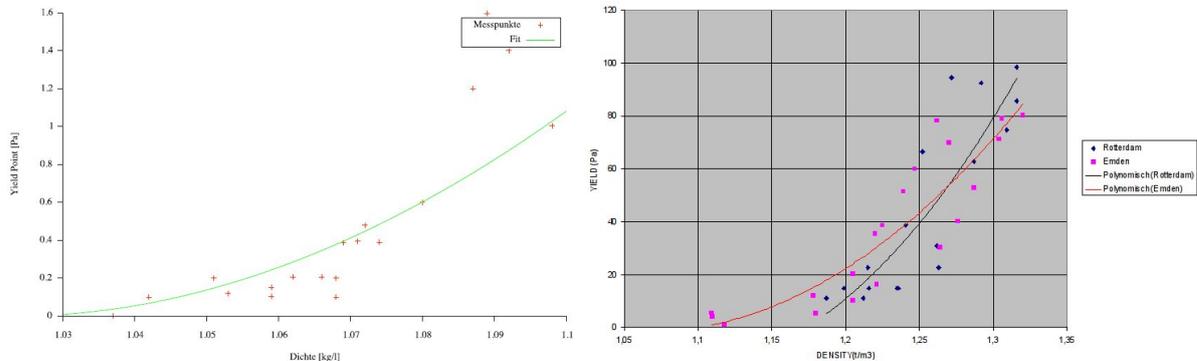


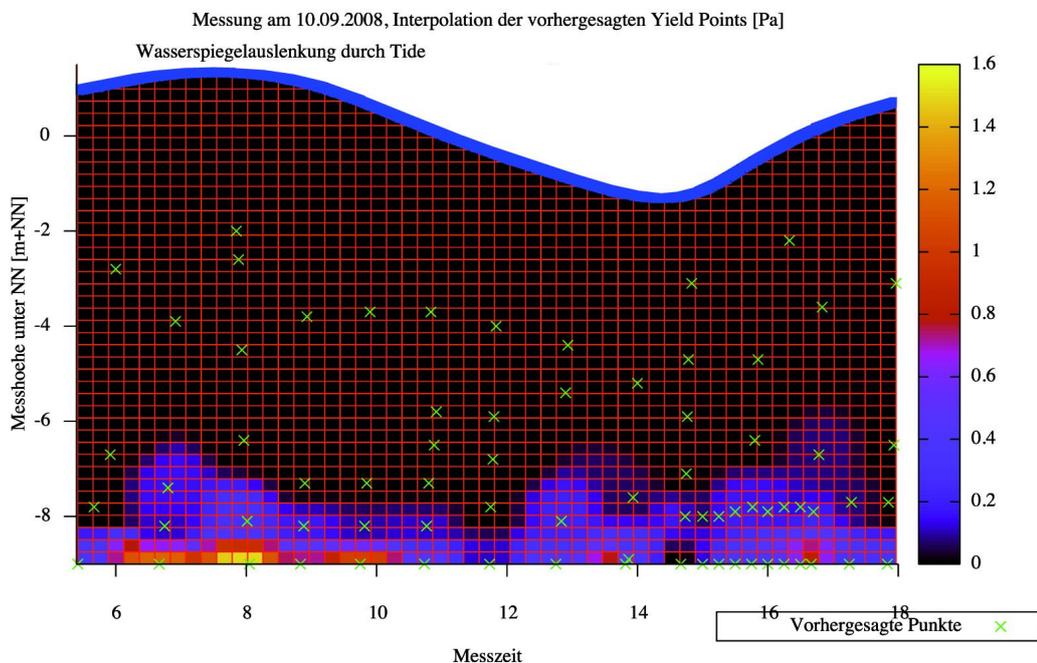
Abbildung 7: Exemplarische Schercurven für Wasser und eine Flüssigschlicksuspension

Die kinematische Viskosität einer Flüssigschlicksuspension ist daher kein konstanter Wert, sondern vom Grad der Scherung sowie auch der Belastungsvergangenheit des deformierten Fluidvolumens abhängig, Abbildung 7. Grundsätzlich ist die kinematische Viskosität von Flüssigschlicksuspensionen um Größenordnungen höher als die von Wasser oder Suspensionen niedriger Konzentration.



**Abbildung 8: Fließgrenzen in Abhängigkeit von der Suspensionsdichte**  
(links: Zorndt, 2009 rechts: Wurpts, 2005)

Fließen kann unter den vorgenannten Umständen erst bei Scherspannungen oberhalb der Fließgrenze stattfinden. Diese kann in erster Näherung als Funktion der Suspensionskonzentration ausgedrückt werden, Abbildung 8, allerdings kommen mit zunehmender Konzentration bzw. Dichte des Flüssigschlicks zunehmend weitere Einflüsse wie beispielsweise biogene Bindungen zwischen den mineralischen Aggregaten zum Tragen, welche den Grad der dichte-basierten Korrelation reduzieren, Abbildung 8 rechts.



**Abbildung 9: Zeitlicher Verlauf der Fließgrenze im Flüssigschlick über einen Tidezyklus der Ems** (Zorndt, 2009)

Die Dichte-Fließgrenzen-Korrelation erlaubt für die in Abbildung 5 dargestellte Variation der Fluidichte die in Abbildung 9 abgebildete Verteilung der Fließgrenzen über Tiefe und Zeit.

#### 4. NUMERISCHE SIMULATION DER FLÜSSIGSCHLICKDYNAMIK

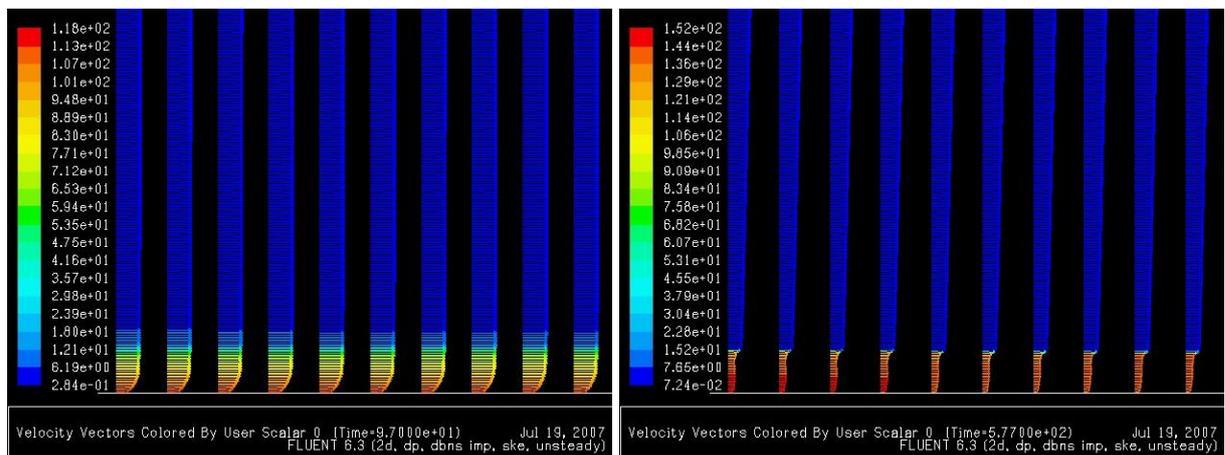
Die Implementierung von numerischen Modellen, welche die Dynamik einer Flüssigschlicksuspension innerhalb eines Wasserkörpers ermöglichen, sind Gegenstand aktueller Forschung. Es soll an dieser Stelle nur das grundsätzliche Vorgehen umrissen und ein Ausblick anhand einer numerischen Konzeptstudie gegeben werden.

Das Franzius-Institut ist zur Zeit im Rahmen einer Kooperation mit dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Darmstadt an der Implementierung eines dreidimensionalen morphodynamisch-numerischen Simulationssystems für Flüssigschlick beteiligt.

Grundsätzlich erfolgt die Berücksichtigung der komplexen Rheologie des Flüssigschlicks durch die Berücksichtigung der kinematischen Viskosität in der Impulsgleichung des Strömungsmodells. Diese wird unter der Annahme Newtonscher Eigenschaften häufig nicht modelliert, da die turbulenzbedingte Scheinviskosität in Freispiegelströmungen i.a. um Größenordnungen höher ist. Die Bestimmung des strukturviskosen Tensors erfolgt in der hier umrissenen Modellformulierung durch eine parametrisierte Zustandsgleichung basierend auf einer Gleichgewichtsfließkurve.

Zusätzlich ist eine Funktion zur Dämpfung des turbulenten Impuls- und Stoffaustausches im Bereich hoher Gradienten der Suspensionskonzentration nötig.

Das im Folgenden kurz dargestellte Simulationsergebnis verdeutlicht die Möglichkeiten des vorstehend beschriebenen Ansatzes. Es handelt sich um die Erweiterung eines dreidimensionalen Strömungsmodells, welches mit einem Stofftransportmodell für eine Sedimentsuspension gekoppelt ist. Die kinematische Viskosität wird auf Basis einer parametrisierten Zustandsgleichung berechnet, welche neben der Scherverflüssigung auch die Belastungsvergangenheit der Suspension mit einbezieht, um thixotrope Prozesse abbilden zu können.



**Abbildung 10: Numerisch berechnete Geschwindigkeits- und Konzentrationsverteilungen zu zwei Berechnungszeitpunkten (Brenda, 2007)**

Die Vektoren zeigen nach Länge und Richtung das berechnete Strömungsfeld, die Farbe der Vektoren zeigt die Konzentration der Suspension. Die Randsteuerung erfolgt derart, dass die im Modell vorhandene Wasser und Sedimentmengen konstant gehalten werden, indem die aus dem Modellgebiet herausströmende Suspension direkt am Einlauftrand wieder eingesteuert wird.

Zum Berechnungsbeginn ist die Suspensionskonzentration mittels einer analytischen Funktion (Rouse-Profil) über die Tiefe verteilt und ein logarithmisches Geschwindigkeitsprofil als Anfangsbedingung vorgegeben, Abbildung 10 links. Während der Berechnung stellt sich die Verteilung suspendierter Sediment dann als lokales Gleichgewicht aus turbulenter Durchmischung und Absinkstrom infolge variabler Sinkgeschwindigkeit ein.

Das Modell berücksichtigt die spezifischen Eigenschaften des Flüssigschlicks in folgenden Aspekten:

- Konzentrationsabhängige Sinkgeschwindigkeit einschl. hindered settling,
- Berechnung der kinematischen Viskosität anhand einer Zustandsgleichung unter Berücksichtigung der Belastungsvergangenheit,
- Dämpfung der turbulenten Austauschprozesse in Abhängigkeit von lokalen Dichte- und Geschwindigkeitsgradienten und
- Reduktion der turbulenten Scheinviskosität im Bereich hoher Suspensionskonzentrationen.

Deutlich erkennbar hat sich zu einem späteren Zeitpunkt der Berechnung, Abbildung 9 rechts, ein geschichteter Wasserkörper eingestellt. Die Geschwindigkeitsverteilung ist nicht länger logarithmisch und das Vertikalprofil der Suspensionsverteilung weist einen sprunghaften Anstieg zwischen den beiden entkoppelten Bereichen auf.

Das hier kurz umrissene Simulationsverfahren erlaubt die Berechnung der komplexen Fluidodynamik einer Flüssigschlicksuspension auf einem diskreten Gitter.

## **5. AUSBLICK**

Die hier vorgestellten Aspekte der Flüssigschlickthematik geben eine Übersicht über die derzeit am Franzius-Institut und in Zusammenarbeit mit anderen Forschergruppen betriebenen Untersuchungen zum Thema. Das Ziel dieser Arbeiten ist neben der grundsätzlichen Verbesserung des Prozessverständnisses die Verbesserung der morphodynamisch-numerischen Simulationsverfahren.

## **6. SCHRIFTTUM**

BRENDA, M.: Erstellung und Anwendung eines numerischen Simulationsmodells zur Berechnung der Dynamik einer hochkonzentrierten Suspension kohäsiven Feinsediments, Diplomarbeit am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Darmstadt, 2007

HABERMANN, C., WURPTS, A.: Occurrence, behaviour and physical properties of fluid mud, Proceedings des Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering (JOINT2008), Darmstadt, 2008

NASNER, H., PIEPER, R., TORN, P. UND KUHLENKAMPF, H.: Properties of Fluid Mud and Prevention of Sedimentation, Proceedings of WODCON XVIII, Orlando, 2007

SCHÖL, A. et al.: Zusammenhänge zwischen Sauerstoffhaushalt und Schwebstoffverteilung in der Unterems-Naturmessungen und Laboruntersuchungen, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, Vortrag im Rahmen des BAW/BfG Kolloquiums in Hamburg, November 2006.

- TREVENHAM, M., WURPTS, A.: High frequency measurements about the water fluid mud boundary in the estuarine zone of the Ems river, Germany, angenommen als Beitrag zum IAHR-Kongress in Vancouver, 2009
- WURPS, R.: 15 Jahre Erfahrung im Umgang mit Fluid Mud, Hansa Maritime Journal, 140. Jahrgang, Hamburg, 2005
- ZORNDT, A.: Feldstudie zur zeitlichen und vertikalen Verteilung sedimentologischer und rheometrischer Kenngrößen über einen Tidezyklus der Ems, Studienarbeit am Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Leibniz Universität Hannover, 2009