

## **Flüssigschlick - Erweiterung eines morphodynamisch-numerischen Simulationsmodells zur Simulation der Dynamik von Flüssigschlick im Bereich der deutschen Nordseeküste und der angrenzenden Ästuar- und Tideflüsse**

Aron Roland und Ulrich Zanke

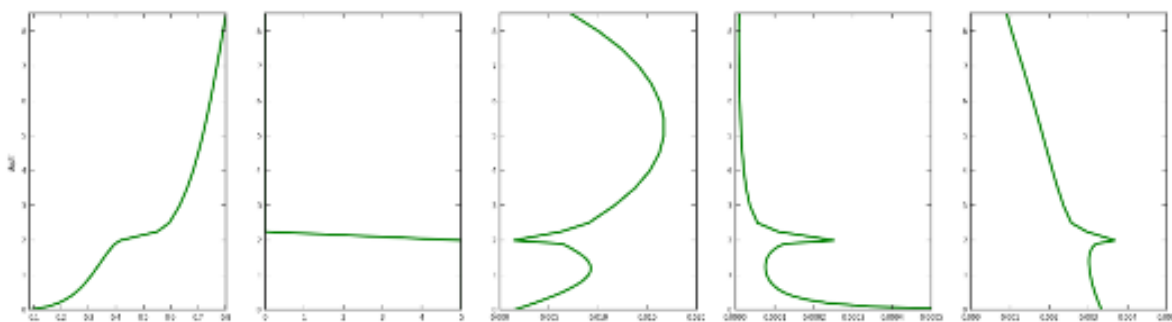
Aufgrund der schnellen Entwicklung der Schiffsgrößen der internationalen Seeschifffahrt und der ständig steigenden Tiefgänge in den letzten Jahrzehnten sind die ausreichenden Wassertiefen im Anfahrtsweg der Seehäfen an der deutschen Nordseeküste ein wesentlicher Standortfaktor geworden, der nur durch 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 Ästuar- und der zugehörigen Tideflüsse an. Insbesondere im Süß-Salzwasser-Mischbereich, der Brackwasserzone, entsteht permanent ein spezielles 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 (Dyer, 1989). Diese Feinsedimente setzen sich insbesondere in strömungsberuhigten Zonen und beim Wechsel der Fließrichtung, den sogenannten Kenterzeiten, ab. Dadurch entsteht sohlennah eine hochkonzentrierte Schlickschicht mit eigenen mechanischen Eigenschaften bezüglich der Fließfähigkeit von Flüssigschlick.

Im Rahmen des Forschungsprojektes 03KIS065 wurde, in Kooperation mit ISMAR-CNR in Venedig, das dort vorhandene Strömungsmodell SHYFEM (Umgiesser, 1995, 1997 u. 2004) erweitert, um die Dynamik von Flüssigschlick abbilden zu können. Weiterhin wurde auch in Kooperation mit Joseph Zhang vom Virginia Institute of Marine Science (VIMS) das SELFE Modell einbezogen, um die Möglichkeit der Simulation der Flüssigschlickdynamik im Rahmen von FLMUD erweitert. Dies wurde erreicht, indem einerseits ein rheologisches Modell implementiert wurde, welches die nicht-Newton'schen Eigenschaften von Flüssigschlick mit Hilfe unterschiedlicher Viskositätsmodelle darstellt und das Strukturverhalten und die thixotropen Eigenschaften des Flüssigschlicks berücksichtigt. Weiterhin wurden die Rückkopplung der infolge des Flüssigschlicks hohen Dichte mit dem Strömungsmodell und der Einfluss der starken Konzentrationsgradienten auf den turbulenten Austausch im Turbulenzmodell berücksichtigt. Die implementierten Erweiterungen wurden in einer Reihe von synthetischen Testfällen zunehmender Komplexität untersucht. Zusätzlich wird in SHYFEM und SELFE, durch Kopplung mit dem Seegangmodell WWMII (Roland et al., 2009), der Seegangseinfluss auf die Schlickdynamik erfasst.

Die gewählten Modelle (SHYFEM u. SELFE) stellen, nach Ansicht der Autoren, den aktuellen Forschungsstand dar und decken einen großen Anwenderkreis von dreidimensionalen numerischen Strömungsmodellen auf unstrukturierten Gitternetzen ab. So wird SHYFEM für eine Vielzahl von Lagunen auf der Welt eingesetzt aber auch operationell für das Mittelmeer (Ferrarin et al. 2012) und die Adria. SELFE wird ebenfalls weltweit von verschiedenen Institutionen für die Modellierung von Ästuaren, Küstengebieten und Binnengewässern eingesetzt. Das SELFE Modell ist von den numerischen Verfahren dem SHYFEM Modell ähnlich hat jedoch den Vorteil, dass schon eine parallele Version vorhanden ist. Beide Modelle verfügen über eine Vielzahl von Erweiterungen, wie z.B. das o.a. Seegangmodell WWMII, Erweiterungen zur Simulation der Wasserqualität, des Sedimenttransportes von nichtbindigen Material sowie Niederschlags-Abflussmodelle. SHYFEM auch SELFE können als integrierte Modellumgebungen für hydraulische und ökologische Untersuchungen im Binnen- und Küsteningenieurwesen bezeichnet werden. Beide Modelle können leicht aus den Datenbanken der Wetterzentren (ECWMF, NOAA, DWD) angetrieben werden und simulieren den Transport von Salinität und Temperatur in 3d auf Grundlage eines drei-dimensional Strömungsfeldes aus der Lösung der Reynolds gemittelten Navier-Stokes Gleichungen (RANS). Das Turbulenzmodell ist in beiden Modellsystemen GOTM (General Ocean Turbulence Model; Umlauf & Burchard, 2002) implementiert.

Die wesentliche Herausforderung bei der Entwicklung des FLMUD Moduls war die Einbettung in die vorhandene numerische Umgebung des jeweiligen Modells. Ein stabiles Integrationsverfahren wurde letztendlich erreicht, indem die zusätzlichen rheologischen Viskositäten auf der neuen Zeitebene

berücksichtigt wurden. Die infolge der Präsenz von Flüssigschlick entstehenden hohen Dichtegradienten und deren Einfluss auf Impulstransport sowie der Turbulenz mussten ebenfalls semi-implizit integriert werden damit am Ende ein effizientes und robustes Integrationsverfahren vorliegt. Das wesentliche Merkmal von FLMUD im Rahmen des kontinuierlichen Ansatzes ist, dass die Flüssigschlickphase im selben Berechnungsgitter abgebildet, was von stabiler Schichtung bis zur vollständigen Durchmischung die verschiedenen hydraulischen Regime darstellen kann. In Abb. 1 sind Ergebnisse von numerischen Experimenten mit dem FLMUD Modul dargestellt. Die Experimente wurden in einem Gerinne durchgeführt, dass 60 km lang ist, 10m tief und 800 m breit ist. Es wurden 5g/l Flüssigschlick eingebracht. Der Flockendurchmesser beträgt hier 6 $\mu$ m. Wie in Abb.1 ersichtlich ist entsteht eine Lutokline mit entsprechender Schichtung. Maßgebend ist hier, dass die Flüssigschlickschicht ebenfalls in Bewegung ist und unterhalb der Lutokline ein turbulentes Regime entwickelt, welches dann letztendlich zur vollständig Vermischung über die Wassertiefe führt. Ähnliche Ergebnisse wurden von Winterwerp (2002) gezeigt. Modelle, die kein turbulentes Regime in der Flüssigschlickschicht beschreiben können, sind nicht in der Lage dies zu simulieren.



**Abbildung 1:** Lutokline mit entsprechender Schichtung. Von links nach rechts, das Geschwindigkeitsprofil, Schlickkonzentration, turbulente Viskosität, Produktion von turbulenter kinetischer Energie (TKE)  $k$  und die zugehörige Dissipation von TKE  $\epsilon$ .

### Literatur:

- Dyer, K.R.: Sediment Processes in Estuaries. Journal of Geophysical Research, 94 (No.10), 1989
- Ferrarin, C., Umgiesser, G., Cucco, A., Hsu, T.-W., Roland, A., Amos, C.L., 2008. Development and validation of a finite element morphological model for shallow water basins. *Coast. Eng.* 55 (9), 716–731
- Ferrarin, C., Bajo, M., Roland, A., Umgiesser, G., Cucco, A., Davolio, S., Buzzi, A., Malguzzi, P., Drofad, O., “Tide-surge-wave modelling and forecasting in the Mediterranean Sea with focus on the Italian coast”, *Ocean Modelling*, accepted for publication at Ocean Modelling.
- Le Hir, P., P. Bassoulet, and H. Jestin, 2001, Application of the continuous modeling concept to simulate high-concentration suspended sediment in a macro-tidal estuary, in *Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes*, Proc. Mar. Sci., vol. 3, edited by W. H. McAnally and A. J. Metha, pp. 229–248, Elsevier Sci., Amsterdam.
- Umlauf, L., Burchard, H., 2003. A generic length-scale equation for geophysical turbulence models. *J. Mar. Res.* 6, 235–265.
- Roland, A., et al., 2009, On the development and verification of a 2-D coupled wave-current model on unstructured meshes, *J. Mar. Syst.* (2009), doi:10.1016/j.jmarsys.2009.01.026
- Roland, A., Zhang, Y.J., Wang H. Y., Meng, Y., Teng, Y.C, Maderich, V., Brovchenko, I, Dutour-Sikiric, M and Zanke, U., 2012, “A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids”, *JGR Oceans*, accepted for publication.
- Umgiesser, G., Bergamasco, A., 1995. Outline of a primitive equations finite element model. *Rapporto e Studi, Istituto Veneto of Scienze, Lettere ed Arti XII*, pp. 291–320.
- Umgiesser, G., 1997. Modelling the Venice Lagoon. *Int. J. Salt Lake Res.* 6, 175–199.
- Umgiesser, G., Melaku Canu, D., Cucco, A., Solidoro, C., 2004. A finite element model for the Venice Lagoon.
- Winterwerp, J.C. 2002. On the flocculation and settling velocity of estuarine mud. *Continental Shelf Research*, 22, 1339-1360.
- Zhang, Y.-L. and Baptista, A.M. 2008 "SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation", *Ocean Modelling*, 21(3-4), 71-96.