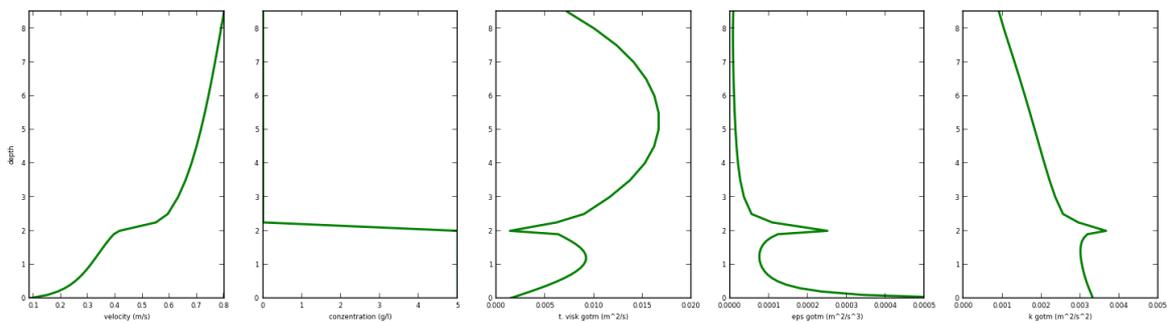


„Flüssigschlick“

Erweiterung eines morphodynamisch numerischen Simulationsmodells
zur Simulation der Dynamik von Flüssigschlick
im Bereich der deutschen Nordseeküste und angrenzenden
Ästuaren und Tideflüssen

Technische Universität Darmstadt



Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Ulrich Zanke
Projektbearbeiter: Dr.-Ing. Aron Roland

Vorwort

Gemäß Nr.6 ANBest-P/GK als Bestandteil des Zuwendungsbescheides vom 25.9.2007 mit dem Förderkennzeichen 03KIS065 ist der Zuwendungsbegünstigte verpflichtet, dem Projektträger sowie der projektbegleitenden Gruppe einen Abschlussbericht über die durchgeführten Arbeiten vorzulegen.

Der wissenschaftliche teil dieses Dokumentes gliedert sich wie folgt:

- Zunächst erfolgt eine kurze Übersicht über die wesentlichen physikalischen Prozesse, die zusätzlich implementiert werden mussten, um die Flüssigschlickdynamik im Modell abbilden zu können,
- im weiteren folgt eine kurze Beschreibung der verwendeten numerischen Verfahren und der Werkzeuge die zur Erstellung der Gebietsmodelle entwickelt wurden,
- zuletzt wird an verschiedenen Testfällen das neue Modul getestet und validiert.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Inhaltsverzeichnis	4
1. Einleitung	5
1.1 Vorhabensbeschreibung	5
1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
1.3 Planung und Ablauf	7
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	7
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	8
2. Eingehende Darstellung	9
2.1 Erzielte Ergebnisse	9
2.1.1 Zusammenfassung	9
2.1.2 Das FLMUD Modul	10
2.1.3.1 Grundgleichungen	10
2.1.3.2 Flockenbildung und Zerfall	14
2.1.3.3 Sinkgeschwindigkeit	15
2.1.3.4 Rheologie	16
2.1.3.6 Seegangseinfluss	22
2.1.3 Eingesetzte numerische Methoden	24
2.1.4 Erstellung der Gebietsmodelle – PolyMesh	24
2.1.5 Anwendungen der Modelle	26
2.1.5.1 Stabile Schichtung und vollständige Durchmischung	26
2.1.5.2 Gravitationsbedingtes fließen von Flüssigschlick	29
2.1.5.4 Erste Anwendungen an der EMS	32
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	34
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	34
2.4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	34
2.4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	34
2.4.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten	35
2.4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	36
2.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	36
2.6 Geplante und erfolgte Veröffentlichungen	36
3. Erfolgskontrollbericht (nicht öffentlicher Teil)	37
3.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen	37
3.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens	37
3.3 Fortschreibung des Verwertungsplans	38
3.4 Arbeiten die zu keinem Ergebnisse geführt haben.	38
3.5 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	38
Literatur:	38

1. Einleitung

1.1 Vorhabensbeschreibung

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 m³ 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 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 (Van der Lee 2000). Hierdurch setzen sich diese insbesondere in strömungsberuhigten Zonen oder beim Wechsel der Fließrichtung, den sogenannten 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 mit suspendiertem Schlick. Welcher Anteil der Baggeraufwendungen auf Fluid Mud entfällt, ist nicht genau bekannt, einen Eindruck vermitteln jedoch die Erfahrungen aus dem Emden Hafen, wo bis zur Etablierung der heutigen in-situ Unterhaltungsstrategie jährlich 4,0 Mio m³ vorrangig aus Flüssigschlick 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, das aus der offenen See eindringt. In einem gezeitenfreien Ästuar stellt sich eine konstante Schichtung des Süß- und des Salzwassers ein, da sich das salzhaltige Meerwasser aufgrund der Schwerkraft unter das zuströmende Oberwasser drängt.

Die Anwesenheit der gezeiteninduzierten Strömungen bewirkt jedoch eine verstärkte Durchmischung der Wassersäule, welche während der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten die durch die Schwerkraft stabilisierte Schichtung

überwindet. Eine ausgesprochene Schichtung stellt sich im deswegen als teildurchmischte bezeichneten Ästuar demnach nur um die Kenterpunkte herum ein, wenn die dann geringen Strömungsgeschwindigkeiten keine Durchmischung bewirken können.

Da der Bereich mit hinreichend starker Strömung analog zur Ausbreitung der Tidewelle ständig durch das Ästuar wandert, führt der beschriebene lokale Schichtungsprozeß auf einer deutlich größeren räumlichen Skala zur sogenannten vertikalen baroklinen Zirkulation. Hierbei setzt die Kenterung zur Flut sohnah zuerst ein, während die Ebbestromkenterung an der Oberfläche beginnt.

Ziel des beantragten Vorhabens war, durch die Erweiterung eines morphodynamisch-numerischen Modells, eine verbesserte Berücksichtigung des Einflusses hochkonzentrierter Suspensionen kohäsiven Materials auf die lokale Strömungsdynamik zu erzielen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde, in Kooperation mit ISMAR-CNR in Venedig, das Strömungsmodell SHYFEM (Umgiesser, 1995, 1997 u. 2004) erweitert, um die Dynamik von Flüssigschlick abbilden zu können.

Dies wurde erreicht, indem einerseits ein rheologisches Modell implementiert wurde, welches die nicht-Newtonschen Eigenschaften von Flüssigschlick mit Hilfe unterschiedlicher Viskositätsmodelle darstellt und das Strukturverhalten und somit die thixotropen Eigenschaften des Flüssigschlicks berücksichtigt.

Weiterhin wurde die Rückkopplung der infolge des Flüssigschlicks hohen Dichte mit dem Strömungsmodell und der Einfluss der starken Konzentrationsgradienten auf den turbulenten Austausch wird 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. Dies ist so unseres Wissens so noch in keiner Forschungsarbeit realisiert worden. Insbesondere in Kombination mit Flüssigschlick sind mit dieser Erweiterung interessante Studien in der Zukunft möglich.

1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben „Flüssigschlick: Erweiterung eines morphodynamisch numerischen Simulationsmodells zur Simulation der Dynamik von Flüssigschlick im Bereich der deutschen Nordseeküste und angrenzenden Ästuaren und Tideflüssen.“, mit dem Förderkennzeichen 03KIS065 ist ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Projekt. Die Laufzeit des Projektes betrug 3 Jahre.

Das Projekt 03KIS065 baut auf den Erfahrungen des vorherigen Projektes 03KIS052. Die Erfahrungen aus den Arbeiten von Wurpts (2006) und Brenda (2010) wurden zu Grunde

gelegt, um das Flüssigschlickmodul FLMUD zu entwickeln, welches dann in zwei verschiedene, vorhandene Strömungsmodelle implementiert wurde, die allgemein in Quelle verfügbar sind. Während der Laufzeit des Projektes wurden drei Zwischenberichte erstellt und es fanden drei Beratergruppensitzungen statt. Die Letzte Sitzung fand am 11.03.2011 statt.

1.3 Planung und Ablauf

Das Forschungsprojekt war auf die Dauer von 3 Jahren ausgelegt und wurde wissenschaftlich an der Technischen Universität Darmstadt, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, ausgeführt. Die Arbeitsplanung bestand im Wesentlichen aus:

- Erweiterung des mathematisch numerischen Modells (Implementierung der zusätzlichen numerischen Methoden)
- Ermittlung einer Zustandsgleichung zur Beschreibung der Kinematik des Flüssigschlicks und der rheologischen Parameter des Flüssigschlicks in seinen verschiedenen Zustandsformen.
- Implementierung in ein vorhandenes numerisches Modell, Validierung und exemplarische Anwendung des erweiterten numerischen Modells.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Mit der Verfügbarkeit von schnelleren und effizienteren Hochleistungsrechnern ist die numerische Modellierung der Morphodynamik ein wesentlicher Bestandteil des Küsteningenieurwesens geworden. Verschiedene Software-Plattformen stehen den Ingenieuren und Wissenschaftlern zur Verfügung. Eine gute Übersicht ist beispielsweise in „MorphoSylt“ Abschlussbericht gegeben.

Die genannten numerischen Modelle sind teilweise kommerziell und teilweise nicht in Quelle verfügbar, arbeiten auf strukturierten oder unstrukturierten Gitternetzen und/oder bilden den Sedimenttransport eher heuristisch als prozessorientiert ab. Die meisten Vorhandenen Modelle sind oft nicht frei und in Quelle erhältlich und rechnen auf strukturierten Gitternetzen, was eine Anwendung in Ästuaren erschwert.

Sehr wenige Modelle davon vermögen die (unterschiedlich vereinfachte) Dynamik von Flüssigschlick abzubilden. Flüssigschlick kann mit Schwebstoffkonzentrationen von über 200g/l in sog. HCMS (*High Concentrated Mud Suspensions, Winterwerp, 2002*) auftreten und dabei ein zeitabhängiges viskos-plastisches Verformungsverhalten aufweisen. Dies macht es notwendig, die auftretenden Dichtegradienten numerisch abbilden zu können, das visko-plastische Verhalten von Flüssigschlick durch eine weitere Zustandsgleichung zu beschreiben und den Einfluss der Turbulenzdämpfung zu berücksichtigen.

Im vorherigen Projekt 03KIS029 wurde ein Konzept verfolgt (Wurpts, 2006), bei dem ein vorhandenes Modell (SMOR3D, Mewis, 2004) erweitert wurde, um den Verbleib von

„Baggergut“ zu untersuchen. Das Konzept der „*kontinuierlichen Modellierung*¹“ von hochkonzentrierten Suspensionen sowie Flüssigschlick wird hier in weitergehende andere bestehende und frei erhältliche numerische Plattformen im Rahmen der FLMUD Bibliothek implementiert.

Die gewählten Modelle (SHYFEM u. SELFE) stellen 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 (Roland et al. 2009). SELFE wird ebenfalls Weltweit von verschiedenen Institutionen für die Modellierung von Ästuaren, Küstengebieten und Binnengewässern. Das SELFE Model ist von den numerischen Verfahren dem SHYFEM Model ähnlich hat jedoch den Vorteil, dass schon eine parallele Version vorhanden ist. Das SHYFEM wird im Moment in Zusammenarbeit mit dem Entwickler ebenfalls parallelisiert.

Beide Modelle verfügen über eine Vielzahl von Erweiterungen wie z.B. das Seegangmodell WWM-II (Roland, 2008), Erweiterungen zur Simulation der Wasserqualität, des Sedimenttransportes sowie Niederschlags-Abflussmodelle. Sowohl SHYFEM als auch SELFE können als integrierte Modellumgebungen für hydraulische und ökologische Untersuchungen im Binnen- und Küsteningenieurwesen bezeichnet werden. Beide Modelle können leicht aus den Datenbasen der Wetterzentren (ECWMF, 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 Plattformen GOTM (General Ocean Turbulence Model; Umlauf & Burchard, 2002). Der numerische Vorteil der Modelle SHYFEM und SELFE, im Gegensatz zum ursprünglich ins Auge gefaßten SMOR3D, liegt in wesentlich effizienteren und robusteren numerischen Verfahren, da die Stabilität des Advektionsverfahrens für den Impuls nicht vom CFL Kriterium abhängt. Es können daher bei gleichbleibend hoher räumlicher Diskretisierung weitaus größere Integrationszeitschritte gewählt werden. Weiterhin stehen in SELFE und SHYFEM mit GOTM eine hochentwickelte und in Quelle vorhandene Turbulenzbibliothek zur Verfügung, die einen großen Nutzerkreis hat und somit validiert und verifiziert ist. SELFE ist zudem vollständig parallelisiert mit allen o.a. Modulen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Vorhabens wurde mit verschiedenen Stellen wissenschaftlich zusammengearbeitet.

Dr.-Ing. Andreas Wurpts (Forschungsstelle Küste des Landes Niedersachsen), der ursprünglich Mit Antragsteller war, stellte rheologische Messungen zur Verfügung und betreute die Arbeit wissenschaftlich.

¹ Alle Transportprozesse werden auf einem einzigen ortsfesten diskreten Gitter innerhalb eines Rechenkerns berechnet.

Am Institut ISMAR-CNR (Istituto di Scienze Marine, Consiglio Nazionale delle Ricerche) wurde mit der Gruppe (Christian Ferrarin, Deborah Belafiore und Marco Bajo), um Prof. Georg Umgiesser das FLMUD Modul in das SHYFEM Modell implementiert. Der Verfasser wurde vor Ort in das SHYFEM Modell eingewiesen und arbeitete u.a. vor Ort an der Implementierung von FLMUD in SHYFEM (Shallow Water Finite Element Model).

Mit Prof. Yinglong Joseph Zhang (CORIE – Centar for Coastal Margin Observation & Prediction, USA) begann die Kooperation Anfang 2010 und man beschloss SELFE mit WWMII zu koppeln und FLMUD in SELFE (A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation) zu implementieren, was ebenfalls im Rahmen der Laufzeit des Vorhabens abgeschlossen wurde.

Mit Prof Le Hir (IFREMER, Brest, Frankreich) und seinen Kollegen wurde Ende 2010 ebenfalls ein wissenschaftlicher Austausch initiiert. Als Ergebnis erhielten wir das Flokkulationsmodell von Vernier (2011) in Quelle, die Implementierung ist jedoch nicht abgeschlossen. Eine Implementierung von SELFE und SHYFEM, sowie ein Vergleich mit der MARS3D (Lazure and Dumas, 2009).

2. Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

2.1.1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Vorhabens wurde das FLMUD Modul entwickelt und in zwei weit verbreitete Strömungsmodelle implementiert. Das neu entwickelte Software Modul wurde an verschiedenen synthetischen Testfällen qualitativ getestet.

In Zusammenarbeit mit Dr. Andreas Wurpts (zunächst Franzius Institut, später FSK Niedersachsen) wurden rheologische Untersuchungen im Rahmen einer Bachelorarbeit (Oberrecht, 2009) durchgeführt die hier im Projekt Verwendung fanden.

Weiterhin wurde das Programm PolyMesh weiterentwickelt, das es erlaubt, unstrukturierte Gitternetze zu erstellen, hierzu wurde ebenfalls eine Bachelorarbeit (Schneider, 2011) angefertigt. PolyMesh wurde genutzt, um die Gebietsmodelle zu erstellen, die für die spätere Anwendung des Modells FLMUD genutzt werden können.

Während der Projektbearbeitung wurde deutlich, dass ohne eine effiziente Parallelisierung, keine effiziente Simulation der Flüssigschlickdynamik in Naturräumen möglich ist. Folglich wurde in Anlehnung an die Parallelisierung im SELFE Modell eine allg. Softwarebibliothek entwickelt, die zur Parallelisierung von numerischen Modellen, die auf unstrukturierten Gitternetzen rechnen, genutzt werden kann. Die Implementierung in SHYFEM ist fortlaufend.

Beide Modelle, SELFE und SHYFEM, wurden mit dem Seegangmodell WWMII (Wind-Wellenmodell II, Roland, 2008) gekoppelt, so dass der Einfluss des Seegangs auf die küstennahe Strömung und damit die Flüssigschlickdynamik ebenfalls berücksichtigt werden

kann. Die Implementierung von WWMII und FLMUD in SELFE ist vollständig parallelisiert und kann auf Großrechenanlagen effizient eingesetzt werden. Die im Rahmen der Forschungsvorhaben entwickelten Softwarepakete werden der breiten Öffentlichkeit im Rahmen der GPL-Lizenz (<http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html>) zu Verfügung gestellt.

2.1.2 Das FLMUD Modul

Das FLMUD Modul (Flüssigschlick Modul) wurde in Fortran programmiert in Anlehnung an die bekannte und oft verwendete Bibliothek GOTM (Generalized Ocean Turbulence Model, Burkhard et al.,2002). Diese Bibliothek kann in beliebige Strömungsmodelle implementiert werden. Die Grenzen der Implementierbarkeit liegen dabei in den numerischen Methoden, die in den Strömungsmodellen verwendet werden. Diese müssen entsprechend robust und stabil sein, damit die starken Gradienten, die in der Lösung auftreten, ohne Oszillationen und Instabilitäten abgebildet werden können.

2.1.3.1 Grundgleichungen

Die zu Grunde gelegte physikalischen Formulierung basiert auf den Arbeiten von Le Hir (2000), Toormann (1997, 2002a und 2002b), Winterwerp (2002) und Hsu et al. (2007, 2009). Die Strömung wird dabei durch die Reynolds gemittelten Navier-Stokes Gleichungen beschrieben, wobei die Gültigkeit der Boussinesq Annahme sowie eine hydrostatische Druckverteilung zu Grunde gelegt wird. Dies wird als „kontinuierliches Modelkonzept“ beschrieben, da keine Mehrphasenströmung behandelt wird. Die Annahme ist für suspendierte Sedimente mit kleinem Korndurchmesser gut zutreffend (s. Ferry & Balachandar, 2001), wobei bei der Bildung von hochkonzentrierten Flüssigschlickschichten jenseits der Fließgrenze ein vollständig anderes hydraulisches Regime in der Flüssigschicht herrscht (viskoses Fließen). Dieser Zustand ist stabil, so lange die Flüssigschlickschicht selbst nicht turbulent wird und sich anfängt zu vermischen. Diese Prozesse können durchaus, im Rahmen des kontinuierlichen Ansatzes, in Kombination mit hochwertigen Ansätzen für die Parametrisierung der Turbulenz mit entsprechenden numerischen Methoden dargestellt werden.

Die hydrodynamischen Grundgleichungen lauten für den Erhalt des Impulses

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \right) - g \nabla \eta + \mathbf{F}, \quad (1)$$

und die Kontinuität

$$\nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

wobei d die totale Ableitung ist, $\mathbf{u}=(u,v)$ der horizontale Geschwindigkeitsvektor, η die Auslenkung der freien Oberfläche, g ist die Erdbeschleunigung und w ist die vertikale Geschwindigkeit. Der explizite Anteil ist gegeben mit

$$\mathbf{F} = \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) - f \mathbf{k} \times \mathbf{u} - \frac{1}{\rho_0} \nabla p_A + \alpha g \nabla \varphi + \mathbf{R}_s, \quad (3)$$

wobei \mathbf{k} der Einheitsvektor in z-Richtung ist, f ist die Coriolis Zahl, α ist der sog. „effective earth-elasticity factor“, φ ist das Tide Potential, ν und μ sind die vertikale und horizontale turbulente Austauschkoefizienten die das Ergebnis des zu Grunde gelegten Turbulenzmodells sind, ρ_0 ist die Referenzdichte von Wasser und p_A is der atmosphärische Druck ist. Die aktuelle Dichte $\rho = \rho(x,T,S)$ wird in Abhängigkeit von Temperatur und Salinität gemäß der UNESCO Formel (z.B. Gill, 1982), ermittelt. Die Randbedingung an der Oberfläche ist definiert durch

$$\nu \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} = \tau_s, \quad z = \eta \quad (4)$$

und an der Sohle ist die Randbedingung vorgegeben zu

$$\nu \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} = \tau_b, \quad z = -h \quad (5)$$

Die Schubspannung an der Oberfläche kann nach Pond & Pickard (1998) approximiert werden oder wird vom Seegangmodell aus dem Spektrum berechnet (s. z.B. Janssen, 2001). Die Schubspannung an der Sohle kann in den unterschiedlichen Modellen nach den gebäuchlichen Ansätzen berechnet werden. Bei den bisherigen Berechnungen wurde eine konstante äquivalente Sandrauhigkeit vorgegeben.

Die turbulente Viskosität wurde mit Hilfe des GLS (Generic Length Scale) - Ansatzes nach Umlauf und Burkhard (2003) approximiert der im Rahmen der GOTM Bibliothek zur Verfügung steht. Der Vorteil von GOTM ist, dass die gebräuchlichsten der verfügbaren Turbulenzmodelle vereint und fortschrittlich modular programmiert ist, sowie FLMUD auch. Dabei lauten die Erhaltungsgleichungen, die Produktion, Dissipation und Transport von turbulenter kinetischer Energie (TKE) und der GLS Variablen ψ beschreiben:

$$\frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\nu_k^\psi \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \nu M_t + \mu N_t^2 - \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\nu_\psi \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\psi}{k} (c_{\psi 1} M_t^2 + c_{\psi 3} \mu N_t^2 - c_{\psi 2} \varepsilon) \quad (7)$$

mit der generischen Längenskala

$$l = (c_\mu^0)^3 \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon}$$

wobei

$$\psi = (c_\mu^0)^p k^m l^n; \quad c_\mu^0 = \sqrt{0.3}. \quad (8)$$

Vertikale turbulente Viskosität und Diffusivität sind gegeben zu

$$\begin{aligned} \nu &= \sqrt{2} s_m K^{0.5} l \\ \mu &= \sqrt{2} s_h K^{0.5} l \end{aligned} \quad (9)$$

Hier sind, ν_k^ψ und ν_ψ vertikale turbulente Diffusivitätsparameter mit

$$\begin{aligned} \nu_k^\psi &= \frac{\nu}{\sigma_k^\psi} \\ \nu_\psi &= \frac{\nu}{\sigma_\psi} \end{aligned} \quad (10)$$

wobei die Stabilitätsfunktionen s_m und s_h beispielsweise nach Kantha & Clayson (1994) und die turbulenten Schmidtzahlen gemäß gewählter Parameterisierung definiert sind (s. Umlauf & Burchard, 2003), wobei eine Vielzahl anderer Formulierungen vorhanden sind. Eines der besonderen Merkmale am „generischen Modell“ ist, dass es mit entsprechender Parameterisierung die wesentlichen Turbulenzmodelle (wie z.B. k - ϵ , k - ω oder Mellor-Yamada 2.5) beinhaltet. Dieser Ansatz ist Quasi-Standard seit der Entwicklung und Verbreitung von GOTM.

Bei der aktuellen Implementierung wird jedoch der horizontale Transport der beiden Skalare vernachlässigt, was bei den meisten, dem Verfasser bekannten numerischen Modellen, der Fall ist. Der Transport von turbulenter kinetischer Energie und Dissipation kann jedoch bei bestimmten Fragestellungen des Sedimenttransportes wichtig sein und sollte in der Zukunft berücksichtigt werden.

Die turbulente Viskosität wird mit der infolge der Präsenz von Flüssigschlick tatsächlichen Viskosität überlagert und es ergibt sich

$$\nu_{app} = \nu + \nu_f \quad (11)$$

Dieser Ansatz wurde von Le Hir (2000) vorgeschlagen und weiterhin von verschiedenen Wissenschaftlern weiter verfolgt z.B. (Toorman, 2002; Winterwerp, 2002, Wurpts, 2006 und Brenda 2007) und ist ein wesentlicher Baustein des *kontinuierlichen Modellkonzepts*.

Der Transport von Temperatur und Salinität ergibt sich zu

$$\frac{dS}{dt} = \nabla(D_h \nabla S) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial S}{\partial z} \right), \quad (12)$$

und

$$\frac{dT}{dt} = \nabla(D_h \nabla T) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\dot{Q}}{\rho C_p} \quad (13)$$

wobei S die Salinität, T die Temperatur, die Absorptionsrate der Sonneneinstrahlung und C_p der spez. Hitzefluss im Wasser. Betrachtet man gelöste Stoffe im Wasser so gelten grundsätzlich die Zusammenhänge, wie für passive Skalare (Temperatur und Salinität), jedoch hat das Sediment eine effektive Sinkgeschwindigkeit die von dem Korn selbst, der Strömung und der Konzentration in der Umgebung des Korns abhängt. Insofern ergibt sich die Erhaltungsgleichung für suspendiertes Sediment im Wasser zu

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla c + \frac{\partial(w_{eff} c)}{\partial z} = \nabla(D_h \nabla c) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (14)$$

mit c der Konzentration des suspendierten Sediments, D_h und D_v sind die horizontale und vertikale Diffusivität gegeben durch

$$D_h = \frac{\mu}{\sigma_s}, \quad (15)$$

$$D_v = \frac{v}{\sigma_s},$$

σ_s ist die turbulente Schmidtzahl, die im Allgemeinen zu 0.7 angenommen wird. Die effektive vertikale Geschwindigkeit für den Transport lautet

$$w_{eff} = w - w_s \quad (16)$$

wobei w_s die Sinkgeschwindigkeit des suspendierten Materials ist. Die Randbedingungen an der Sohle und der Oberfläche sind gegeben durch

$$D_v \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{Sohle} = w_s c - E \quad (17)$$

und

$$D_v \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{Oberfläche} = -w_s c. \quad (18)$$

2.1.3.2 Flockenbildung und Zerfall

Flüssigschlick ist, in dem hier zu Grunde gelegten Gedankenmodell nach bspw. Winterwerp (2002), eine Ansammlung von Flocken die ein stabiles Netzwerk ausbilden, wenn sich die diese absetzen können. Das Netzwerk kann zerfallen wenn die angreifenden Kräfte größer sind als die inneren Kräfte, die das Netzwerk zusammenhalten. In diesem Fall kommt es zur Erosion des Schlickes.

Bei diesen Prozessen kommt es zu Aggregation von Flocken bzw. zerfallen diese in Abhängigkeit des Strömungsgeschehens. Wenn sich Flocken ausbilden oder zerfallen ändert sich der wirksame Durchmesser als auch die Dichte. Zwischen der Konzentration c , der volumetrischen Flockenkonzentration ϕ und der Anzahl der Flocken pro Volumeneinheit N besteht folgender Zusammenhang:

$$\phi = \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_f - \rho_w} \right) \frac{c}{\rho_s} = \frac{c}{\rho_s} \left[\frac{D}{D_p} \right]^{3-n_f} = f_s N D^3 \quad (19)$$

Hier ist ρ_s die Rohdichte des Materials, ρ_w ist die Dichte der Flüssigkeit, D ist der aktuelle Flockendurchmesser, D_p der Durchmesser der Primärpartikels, f_s ist ein Formfaktor (im Allgemeinen, $f_s = 0.6$) und n_f ist die fraktale Dimension die im Allg. zu 2 angenommen werden kann. Leicht erkennt man das für den Fall, dass für $D = D_p$ die Flockenkonzentration der Sedimentkonzentration entspricht. Die fraktale Dimension kann man nach Khelifa und Hill, 2006 folgendermaßen approximieren.

$$n_f = \alpha \left(\frac{D}{D_p} \right)^\beta \quad (20)$$

Die Dichteänderung infolge der Präsenz von Schlick ist nach Kranenburg (1994) gegeben zu

$$\rho_f - \rho_w = (\rho_s - \rho_w) \left[\frac{D}{D_p} \right]^{n_f-3}, \quad (21)$$

hier ist ρ_f die Dichte des Schlicks, ρ_w ist die Dichte vom Wasser und ρ_s ist die Rohdichte des Sediments. Die letztendlich maßgebende Dichte ist gegeben durch

$$\rho = \rho_w + \left(1 - \left(\frac{\rho_w}{\rho_s} \right) \right) c \quad (22)$$

In der aktuellen Version von FLMUD wurde das Flokkulationsmodell von Son & Hsu (2008) implementiert welches Aggregation und Zerfall der Flocken nach folgender Gleichung abbildet.

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\dot{\gamma} D_p^\beta}{\beta \ln \frac{D}{D_p} + 1} \left[\frac{c}{3\rho_s} k'_A D_p^{n_f-3} D^{-n_f+4+\beta} - \frac{k'_B}{3} \left(\frac{v \cdot \dot{\gamma}}{F_y} \right)^{0.5} D_p^{-1} D^{-\beta+2} (D - D_p) \right] \quad (23)$$

Die freien Parameter sind nach Son & Hsu vorgegeben. Der wesentliche Nachteil der Gleichung ist, dass unterhalb der Fließgrenze, wenn die Scherrate gegen Null geht, der Flockendurchmesser gegen unendlich geht, was dann in FLMUD mit dem Gleichgewichtsdurchmesser D_e limitiert wird (hier wurde der max. Flockendurchmesser 300µm festgelegt).

Eine Implementierung des Flokkulationsmodells Models nach Vernier et al. (2011) ist in Arbeit.

2.1.3.3 Sinkgeschwindigkeit

Das Konzentrationsprofil von suspendierten Sedimenten und so auch von suspendiertem Flüssigschlamm hängt im wesentlichen von der Verteilung der turbulenten Viskosität und der Sinkgeschwindigkeit ab. Wobei die Sinkgeschwindigkeit von flokkuliertem Material von der wirksamen Korngröße D und der effektiven Dichte ρ_f abhängt (s. Gl. XX) die seinerseits vom zu Grunde gelegten Flokkulationsmodell abhängen.

Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass bei Erreichen der sog. „Gelling“ Konzentration die Sinkgeschwindigkeit gegen Null geht und das sedimentierte Material anfängt zu konsolidieren. Die „Gelling“ Konzentration ergibt sich aus fraktaler Dimension und dem Verhältnis zwischen effektivem und Primärdurchmesser zu

$$c_{gel} = \rho_s \left(\frac{d}{D} \right)^{3-n_f} \quad (24)$$

und

$$\phi_p = \frac{c_{gel}}{\rho_s} \quad (25)$$

Im FLMUD Modul wurde für die Sinkgeschwindigkeit der vielfach benutzte Ansatz von Zanke (Gl. 23) für natürliches Sediment verwendet, wie auch in Le Hir (2000), wobei der Einfluss der Konzentration auf die Sinkgeschwindigkeit nach Winterwerp (2002) berücksichtigt wird, was letztendlich zu nachfolgender Formulierung der Sinkgeschwindigkeit ohne Konzentrationseinfluss ergibt.

$$w_{s,0} = 11 \frac{v}{D} \sqrt{1 + 0.01 D_*^3} - 1 \quad (26)$$

Bei Berücksichtigung des verzögerten Absinkens infolge erhöhter Konzentration ergibt diese sich letztendlich zu

$$w_s = w_{s,0} \cdot \Theta \quad (27)$$

mit

$$\Theta = \frac{\left((1-\phi) \cdot (1-\phi_p) \right)}{(1+2.5 \cdot \phi)}, \quad (28)$$

dem Reduktionsfaktor nach Winterwerp (2002).

2.1.3.4 Rheologie

Der lokale und zeitabhängige Zustand von Flüssigschlick muss durch eine zusätzliche Zustandsgleichung berücksichtigt werden, welche im besten Fall die komplexen Abhängigkeiten vom biologischen Belebungsstatus sowie der Belastungsvergangenheit und dem daraus resultierenden zeitabhängigen viskos-plastischen Verformungsverhalten beschreibt.

Ist diese bekannt kann aus der lokalen Scherrate und der mit Hilfe der Zustandsgleichung berechneten lokalen Viskosität das lokale Fließverhalten des Flüssigschlicks prognostiziert werden. Der vorgenannte Zusammenhang wird unter stationären Verhältnissen als Stoffgesetz bezeichnet. Infolge der Abhängigkeit von der Belastungsvergangenheit (Thixotropie) und der Tatsache, dass die Flüssigschlick-Schicht bei ausreichender Belastung jederzeit in Suspension gehen kann, erweitert sich dieses zur oben genannten Zustandsgleichung.

Die Zustandsgleichung von Flüssigschlick kann mit unterschiedlich aufwendigen Materialmodellen gebildet werden. Die einfachste Form bildet das sog. Bingham-Modell mit konstanter kinematischer Viskosität und einer Fließgrenze. Es verfügt mit den oben beschriebenen Anforderungen über zwei durch Messdaten zu kalibrierende Parameter und kann keine Thixotropie berücksichtigen. Das Bingham-Modell muss, da für unendlich kleine Scherraten eine gegen unendlich gehende Viskosität berechnet würde, durch eine zusätzliche Begrenzungsfunktion erweitert werden.

Die vorstehend beschriebenen Einschränkungen legen eine Erweiterung des Materialmodells nahe, die in der von Worrall & Tulliani vorgestellten Formulierung verfügbar ist. Hier wird ein exponentieller Zusammenhang (Herschel-Bulkley-Modell, zwei Parameter) mit einer Fließgrenze kombiniert.

Toorman (1997) hat zudem eine Erweiterung dieses Ansatzes zur Berücksichtigung von Thixotropie vorgestellt, welche als zusätzlichen Parameter die vorstehend beschriebene sog. „strukturelle Integrität“ erfordert. Diese ist von der lokalen Situation sowie der Art der vorhergehenden Belastung (zeitl. Abfolge von Scherungs- und Relaxationsphasen, sog. „Belastungsvergangenheit“) abhängig. Die zeitvariablen Scherkurven des Flüssigschlicks

können hierbei mit Hilfe der Zustandsgleichung aus der sog. Gleichgewichtsfließkurve des Materials berechnet werden.

Dieser Ansatz wurde von Oberrecht (2011) aufgegriffen und es wurden Proben aus dem Ems ausgewertet, um die entsprechend EFC (Equilibrium Flow Curve) Parameter anzupassen. Zusätzlich standen die Messungen von Nasner & Pieper (2009) zur Validierung der Anpassungsfunktionen zur Verfügung. Im Rahmen des Vorhabens wurde eigens eine Routine in Matlab programmiert mit dem Ziel der Implementierung in FLMUD, so dass der Nutzer lediglich die gemessenen Fließkurven als Randbedingung vorgeben braucht, woraus dann die entsprechenden EFC Parameter für die Anpassungsfunktion nach Toorman (1997) ermittelt werden. In dieser Arbeit wurde die von Oberrecht (2009) ermittelte Parametrisierung geringfügig modifiziert, so dass v_f für Klarwasser verschwindet und andererseits die Gleichung effizienter zu berechnen ist.

Die effektive kinematische Viskosität infolge Schlick wurde in dieser Arbeit, wie auch schon in Brenda (2007), nachdem Model von Toorman (1997), unter Zugrundelegung einer weiteren Transportgleichung zur Berücksichtigung der Hysterese-Effekte und einer empirischen Abhängigkeit von der vorhandenen Dichte, abgebildet.

Die Schubspannung in einer gescherten Schlickschicht kann, nach Toormann (1997), abgebildet werden nach folgender Gleichung:

$$\tau_{(\dot{\gamma})} = \tau_0 \cdot \lambda_{(\dot{\gamma})} + \left(\mu_\infty + c \cdot \lambda_{(\dot{\gamma})} + \frac{\beta \cdot \tau_0}{1 + \beta \cdot \dot{\gamma}} \right) \cdot \dot{\gamma} \quad (29)$$

Hier ist τ_0 die Fließgrenze, μ_∞ ist die dynamische Viskosität bei max. Scherrate, μ_0 ist die dynamische Viskosität, λ ist der Strukturparameter nach Toorman (1997), β beschreibt das Verhältnis zwischen Aufbau und Zerfall der Struktur und c ist die Differenzviskosität

$$c = \mu_0 - \mu_\infty \quad (30)$$

Die dynamische Viskosität μ_f ergibt sich nach Differenzierung der Schubspannung nach der Scherrate

$$\frac{\partial \tau_{(\dot{\gamma})}}{\partial \dot{\gamma}} = \mu_f = \tau_0 \cdot \lambda'_{(\dot{\gamma})} + \left(c \cdot \lambda'_{(\dot{\gamma})} - \frac{\beta^2 \cdot \tau_0}{(1 + \beta \cdot \dot{\gamma})^2} \right) \cdot \dot{\gamma} + \mu_\infty + c \lambda_{(\dot{\gamma})} + \frac{\beta \cdot \tau_0}{(1 + \beta \cdot \dot{\gamma})} \quad (31)$$

Ein einfacher linearer Zusammenhang zwischen Scherrate und Schubspannung kann **nur** bei newtonschen Fluiden Zugrunde gelegt werden, hier ist die sogenannte „**differentielle Viskosität**“ maßgebend. Die kinematische Viskosität ist wie üblich definiert ist zu

$$v_f = \frac{\mu_f}{\rho} \quad (32)$$

Die Erhaltungsgleichung des Strukturparameters ist nach Toorman (1997)

$$\frac{d\lambda}{dt} = -(a + b\dot{\gamma})(\lambda - \lambda_e) \quad (33)$$

Hier bestimmen a und b den Aufbau bzw. Zerfall der Struktur und λ_e ist der Strukturparameter im Gleichgewichtszustand.

$$\lambda_e = \frac{a\lambda_0}{a + b\dot{\gamma}} = \frac{\lambda_0}{1 + \beta\dot{\gamma}} \quad (34)$$

Die Ableitung des Strukturparameters nach der Scherrate ist nicht bekannt und kann vernachlässigt werden, da bei der numerischen Lösung des Gleichungssystems davon ausgegangen wird, dass die Strömungsgeschwindigkeiten während eines Integrationszeitschrittes konstant sind.

Die o.a. Parameter wurden von Oberrecht (2009) für einen Auszug der durchgeführten rheologischen Untersuchungen angepasst und sind nach Optimierung folgendermaßen im FLMUD Modul abgebildet.

$$\begin{aligned} \mu_0 &= 0.012 \cdot (e^{63\rho_R} - 1) \\ \mu_\infty &= 1.16\rho_R^2 + 0.1\rho_R \\ \beta &= 72\rho_R^2 + 6\rho_R \\ \tau_0 &= 5000\rho_R^3 - 340\rho_R^2 + 10\rho_R \end{aligned} \quad (35)$$

Mit

$$\rho_R = \frac{\rho}{1000} - 1 \quad (36)$$

Weiterhin haben wir unterschiedliche mathematische Funktionen ebenfalls an die vorhandenen Datensätze von Oberrecht (2009) und Wurpts (2005) angepaßt und mit den Messungen von Nassner & Pieper verglichen. Folgende Funktionen wurden weiterhin angepasst, um festzustellen ob Funktionen der Form nach Worall & Tulliani oder ein einfacher „tanh“ Ansatz bessere Anpassungen ergeben als die vorgeschlagene Anpassung nach Oberrecht (2009).

$$\begin{aligned}\tau_{(\dot{\gamma})} &= f_0(\dot{\gamma}) = \alpha_0 + \beta_0 \dot{\gamma} + \chi_0 \tanh(c_0 \dot{\gamma}) \\ \tau_{(\dot{\gamma})} &= f_1(\dot{\gamma}) = \alpha_1 + \beta_1 \dot{\gamma} + \chi_1 \frac{1}{1 + c_1 \dot{\gamma}}\end{aligned}\quad (37)$$

Wir nehmen nun an, dass die Koeffizienten α_i , β_i , und χ_i , in einer gewissen Potenz folgendermaßen approximiert werden können.

$$\alpha_i = \alpha'_i (\rho - 1)^{e_i}; \beta_i = \beta'_i (\rho - 1)^{e_i}; \chi_i = \chi'_i (\rho - 1)^{e_i}\quad (38)$$

Es sind also fünf freie Parameter zu bestimmen.

Gehen wir nun aus von einer gewissen Anzahl von Messungen $(s_i)_{i=1}^M$ mit korrespondierenden Scherraten $(g_i)_{i=1}^M$, wie oft vorhanden, dann definieren wir für eine beliebige Fließfunktion f_i .

$$W(f, s, g) = \sqrt{\sum_{j=1}^M w_j (f(g_j) - s_j)^2}\quad (39)$$

$W_{(f,g,s)}$ gilt es nun zu minimieren, wobei die gesuchten Wichtungen w_i strikt positiv sein sollen. $W_{(f,g,s)}$ wird minimiert indem die nichtlinearen Koeffizienten C_i und e_i festgelegt werden und nachfolgend die L2-Norm für die übrigen Koeffizienten optimiert wird, um dann abschließend über die nichtlinearen Koeffizienten zu iterieren. Letztendlich findet man auf Grundlage des Datensatzes von Wurpts (2005) und Oberrecht (2009) folgenden funktionalen Zusammenhang zwischen Schubspannung, Dichte und Scherrate.

$$\begin{aligned}f_{0(\dot{\gamma}, \rho)} &= (\rho - 1)^{2.2273} \{255.8870 + 640.9764 \tanh(0.2391 \dot{\gamma} + 8.025 \dot{\gamma})\} \\ f_{1(\dot{\gamma}, \rho)} &= (\rho - 1)^{2.2273} \left\{ 1145.2816 + 906.5783 \frac{1}{1 + 0.2344 \dot{\gamma}} + 5.0116 \dot{\gamma} \right\}\end{aligned}\quad (37)$$

Wir prüfen die Güte der Anpassung der Funktion, vorgeschlagen von Oberrecht (2009), Malcharek (2010), sowie die der Funktionen f_0 und f_1 , indem wir die Regressionswolken gegenüberstellen, hier sind farblich dargestellt die Dichte der Messpunkte pro Datenpunkt, m ist die Steigung der linear Regressionsfunktion, c die Korrelation und s die Streuung. Es ist deutlich zu sehen, dass bezogen auf die zugrunde gelegten Datensätze die hier angepassten Funktionen die besten Ergebnisse zeigen, was aber durchaus trivial ist. Da die Anpassung von Oberrecht die Daten von Wurpts nicht beinhalten und die Daten von Malcharek (2010) ebenfalls auf einen anderen Datensatz angepasst worden sind, der im

Mittel geringere Schubspannungen bei gleichen Scherraten aufzeigt. Vergleicht man nun die vorgestellten Anpassungsfunktionen mit dem Datensatz von Nassner & Pieper (2009), so wird deutlich, dass sowohl Art der Entnahme, Bedienung und Fabrikat des Rheometers, Belastungshistorie als auch Zusammensetzung des Schlickes, u.a. zu einer starken Streuung der Messergebnisse führen. Grundsätzlich wäre eine Normierung der Art der Entnahme sowie des Verfahrens der Beprobung, begrüßenswert. Ansonsten ist die Streuung zu groß für eine repräsentative und quantitativ sensible Anpassungsfunktion (s. Abb. 2) und man kann nur von einer qualitativen Anpassung sprechen.

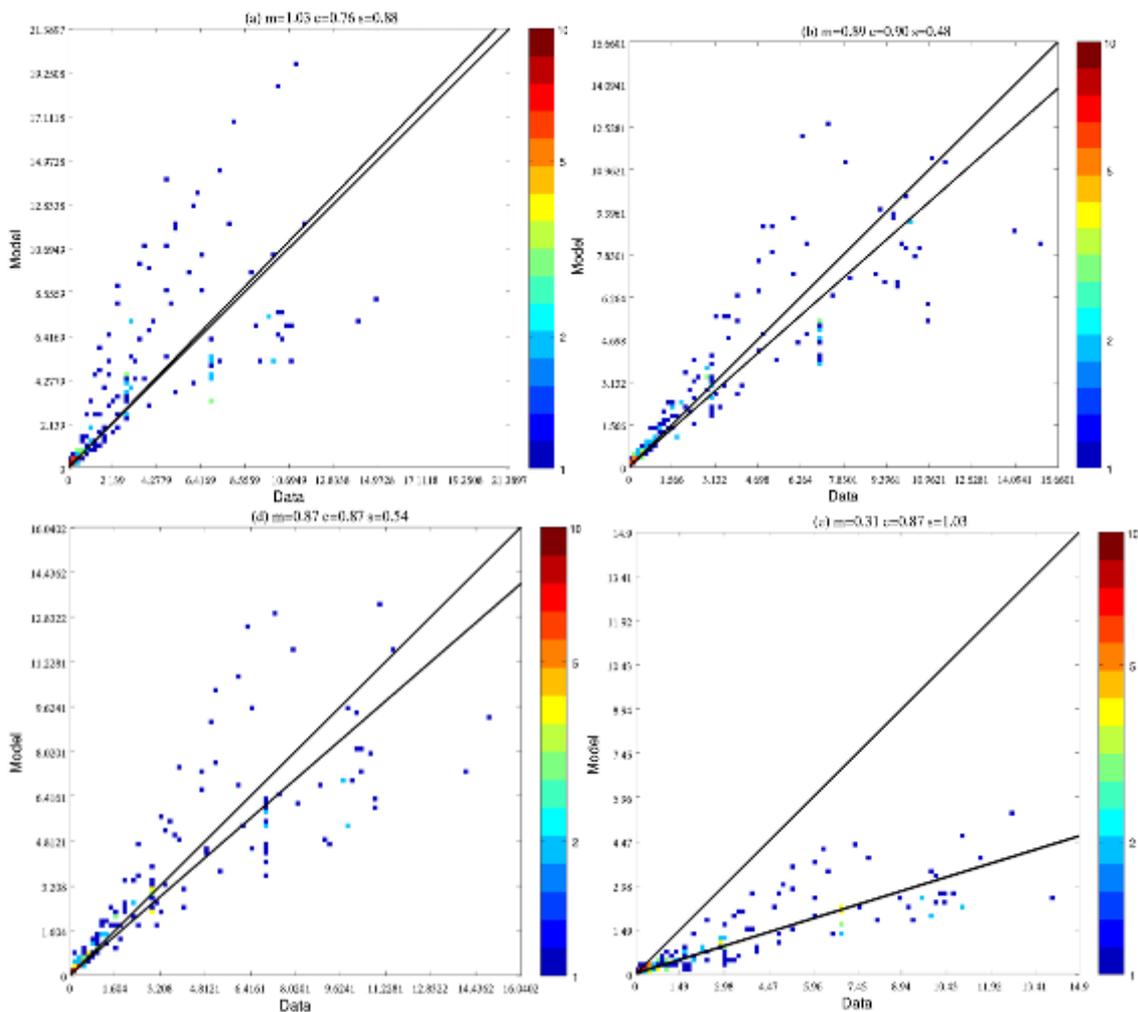


Abbildung 1: Regressionswolken für die gewählten Anpassungsfunktionen von a.) Gl. 32, b.), f1, c.) f2 und d.) Malcharek (2010)

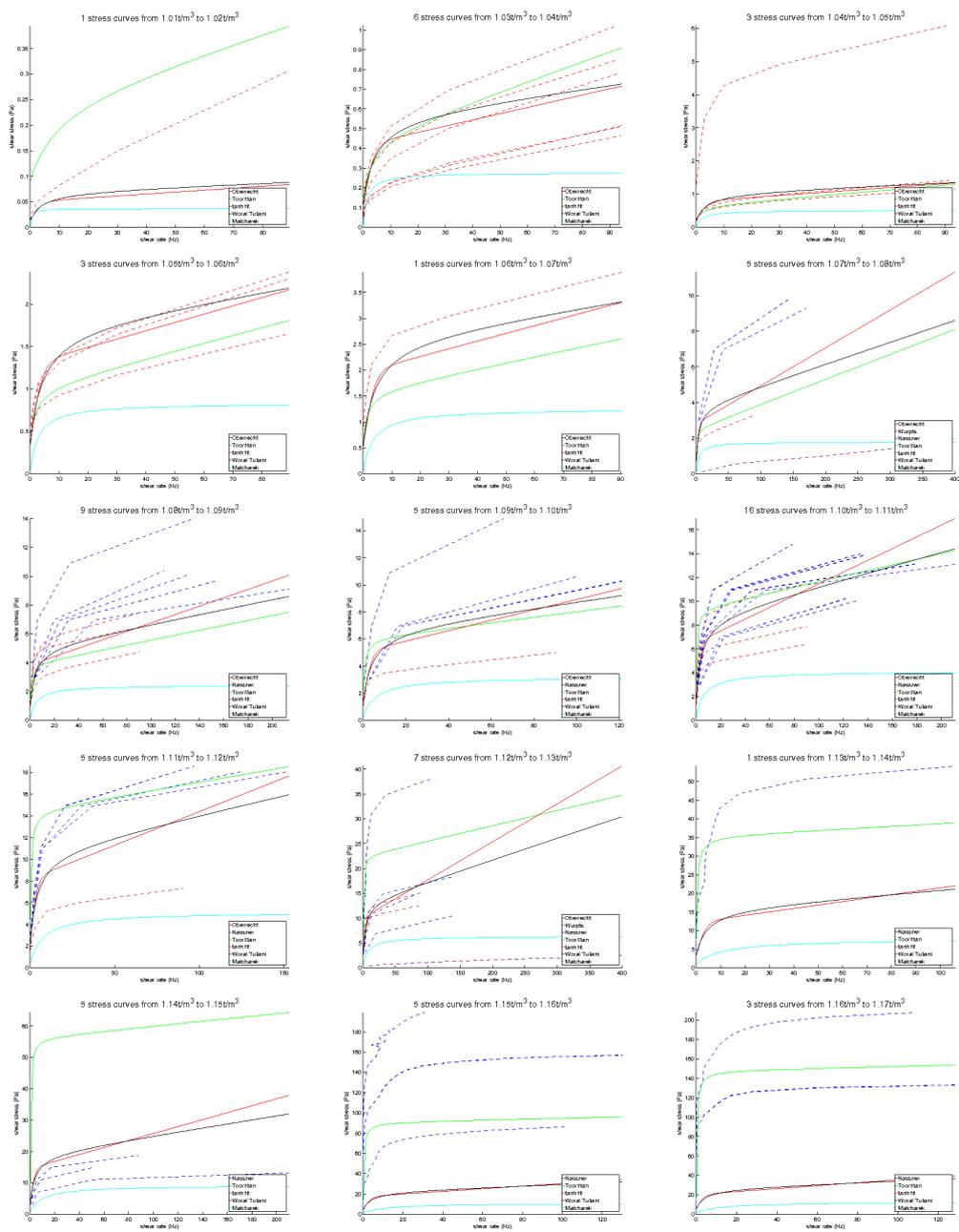


Abbildung 2: Gemessene Fließkurven unterteilt in Dichteklassen der Breite 0.01kg/m³ und die entsprechenden Anpassungsfunktionen.

2.1.3.6 Seegangseinfluss

Der Seegangsanteil R_s in der Impulsgleichung wird an dieser Stelle vereinfacht nach Longuet-Higgins and Stewart (1962, 1964) abgebildet mit

$$\mathbf{R}_s = (R_{sx}, R_{sy})$$

$$R_{sx} = -\frac{1}{\rho_0 H} \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0 H} \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \quad (37)$$

$$R_{sy} = -\frac{1}{\rho_0 H} \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0 H} \frac{\partial S_{xy}}{\partial x}$$

S_{xx}, S_{xy}, S_{yy} sind die diagonalen Komponenten des sog. "radiation stress" Tensors, der für ein allg. Seegangsspektrum nach Battjes (1974) wie folgt definiert ist:

$$S_{xy} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} N_{(\sigma, \theta)} \sigma \frac{c_g(\sigma)}{c_p(\sigma)} \sin(\theta) \cos(\theta) d\theta d\sigma \quad (38)$$

$$S_{xx} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} N_{(\sigma, \theta)} \cdot \sigma \cdot \left[\frac{c_g(\sigma)}{c_p(\sigma)} (\cos^2(\theta) + 1) - \frac{1}{2} \right] d\theta d\sigma \quad (39)$$

$$S_{yy} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} N_{(\sigma, \theta)} \cdot \sigma \cdot \left[\frac{c_g(\sigma)}{c_p(\sigma)} (\sin^2(\theta) + 1) - \frac{1}{2} \right] d\theta d\sigma \quad (40)$$

$H = h + \eta$ ist die Wassertiefe, θ und σ sind die Richtung und die Frequenz einer jeden Partialwelle im Spektrum, c_g and c_p sind die Gruppen- und Phasengeschwindigkeit jeder Spektralkomponente. Im flachen Wasser, wenn die Wellen eine sog. Wellengrenzschicht ausbilden, kann der Einfluss des Seegangs zu deutlich größeren effektiven Schubspannungen führen. Die Wellengrenzschicht wurde hier nach Grant & Madsen (1979) und weiterhin nach Mathisen und Madsen (1996) und Zhang et al. (2004). Diese formulierung ersetzt die übliche Rauigkeitsformulierung durch die effektive Rauigkeitshöhe z_{0b} . Der quadratische Rauigkeitsansatz ist gegeben zu

$$\tau_b = \rho_0 C_D |\mathbf{u}| \mathbf{u}$$

$$C_D = [\kappa / \log(z_b / z_0)]^2 \quad (41)$$

hier sind $\kappa=0.4$ die Karman konstante, z_b ist die Diskretisierungslänge in der ersten Bodenzelle, z_0 ist die Rauigkeitshöhe die auf Grundlage der Sand- bzw. Formrauigkeit aus der zu Grunde gelegten Rauigkeitsmodells.

Die Sohlschubspannung ist definiert zu

$$\tau_w = 0.5\rho_0 f_w U_w^2 \quad (39)$$

Wobei U_w die Orbitageschwindigkeit an der Sohle ist die sich aus dem Seegangsspektrum wie folgt berechnet

$$U_w^2 = \int \frac{N_{(\sigma,\theta)} \sigma^3}{\sinh^2 kH} d\sigma d\theta \quad (40)$$

Der kombinierte Einfluss von Strömung und Seegang auf die Grenzschicht und die effective Sohlschubspannung wird mit dem Faktor f_w beschrieben (Zhang et al., 2004)

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{|\tau_b|}{\tau_w} \\ C_\gamma &= (1 + 2\gamma |\cos \theta_w| + \gamma^2)^{1/2} \\ f_w &= C_\gamma \exp \left[5.61 \left(\frac{C_\gamma U_w}{30 z_0 \omega} \right)^{-0.109} - 7.30 \right] \end{aligned} \quad (41)$$

Die o.a. Gleichungen werden iterativ gelöst. Die effektive Rauigkeitshöhe errechnet sich dann zu

$$z_{0b} = \delta_{wc} \left(\frac{\delta_{wc}}{z_0} \right)^{-\sqrt{|\tau_b|/(C_\gamma \tau_w)}} \quad (42)$$

Wobei die Mächtigkeit der Wellengrenzschicht folgendermaßen definiert ist.

$$\delta_{wc} = \sqrt{\frac{C_\gamma \tau_w}{\rho_0}} \exp \left[2.96 \left(\frac{C_\gamma U_w}{30 z_0 \omega} \right)^{-0.071} - 1.45 \right] \quad (43)$$

Die effektive Rauigkeitshöhe $z_{0,b}$ wird dann zur Berechnung der Schubspannung nach dem quadratischen Ansatz zu Grunde gelegt. Dieser Ansatz wurde in SELFE-WWM-FLMUD implementiert und ist in SHYFEM bis auf den Teil der Wellengrenzschicht ebenfalls implementiert. Der Einfluss der Strömung auf den Seegang und weitere Details können in

den entsprechenden Veröffentlichungen (Roland et al. 2009, Roland et al. 2012) entnommen werden.

2.1.3 Eingesetzte numerische Methoden

Die Lösung der Transportgleichungen erfolgt in beiden Modellen mit sogenannten TVD (Total Variation Diminishing, Harten, 1983) Methoden, diese Methoden sind konservativ, monotone und von 2. Ordnung in Zeit und Raum. Die rechte Seite der Transportgleichungen wird mit einem Runge-Kutta Verfahren 3. Ordnung nach Shu & Osher (1989) integriert, die letztendlich Lösung von Gl. 20 und 30, wird dann im Fraktionalem Schritt Verfahren nach Yanenko (1971) integriert.

2.1.4 Erstellung der Gebietsmodelle – PolyMesh

Im Rahmen des Vorhabens waren Gebietsmodelle zu erstellen, was im Küsteningenieurwesen, insbesondere wenn unstrukturierte Gitternetze in Betracht gezogen werden, kompliziert und Zeitaufwendig sein kann. Insofern wurde schon lange vor dem Vorhaben vom Verfasser das „PolyMesh“ Projekt ins Leben gerufen, um eine frei erhältliche Bibliothek basierend auf dem bekannten „TRIANGLE“ Programm (Swerdchuk, XXXX), welches ebenfalls frei in Quelle erhältlich ist, der Gemeinschaft zur Verfügung zu stellen. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde diese Bibliothek erweitert und es wurde an der FH Darmstadt eine Bachelorarbeit (Schneider, 2011) angefertigt. Das PolyMesh Programm hat nunmehr eine relative Maturität erreicht und wird von vielen Stellen weltweit verwendet. So nutzen PolyMesh mittlerweile:

- SHOM
- IFREMER
- ECMWF
- ISMAR-CNR

Eine Veröffentlichung der Quellen ist in Arbeit und das Projekt harmoniert vorzüglich mit dem KFKI Projekt 03KIS050, wo die „Extraktion von Bruchkanten aus Laserhöhendaten von Inselgebieten, Watten und Vorländern“ erarbeitet wurde. PolyMesh kann in der aktuellen Version:

- Hoch effiziente parallele Interpolation und Vermaschung von einer beliebigen Anzahl an Peildaten.
- Hilbert Sortierung und eigene Methoden zu Verbesserung des L1 und L2 „Cache“ Effizienz, sog. „Cache“ Lokalisierung.
- Bruchkaten auf Grundlage von Strukturlinien
- Verfeinerung auf Basis beliebiger Polygone
- A priori Vermaschung auf Grundlage von CFL und der Tiefenverteilung.

Wir hoffen auf eine weitere Verbreitung der Bibliothek und werden diese in Kürze öffentlich machen im Rahmen von GPL.

In Abb. 3 und 4. haben wir am Beispiel der EMS ein Ergebnis von PolyMesh dargestellt. Die Vermaschung und mehrfache Iteration inklusive Interpolation von einer Datenbasis von 7.3Mio Messpunkten dauert auf einen handelsüblichen PC weniger als eine Minute. Somit können effizient Gebietsmodelle angepasst werden.

Die jeweiligen Ergebnisse sind beliebig rekonstruierbar, so dass ein effizientes Arbeiten, an einem Gebietsmodell, über verschiedene Arbeitsgruppen hinweg einfach möglich ist.

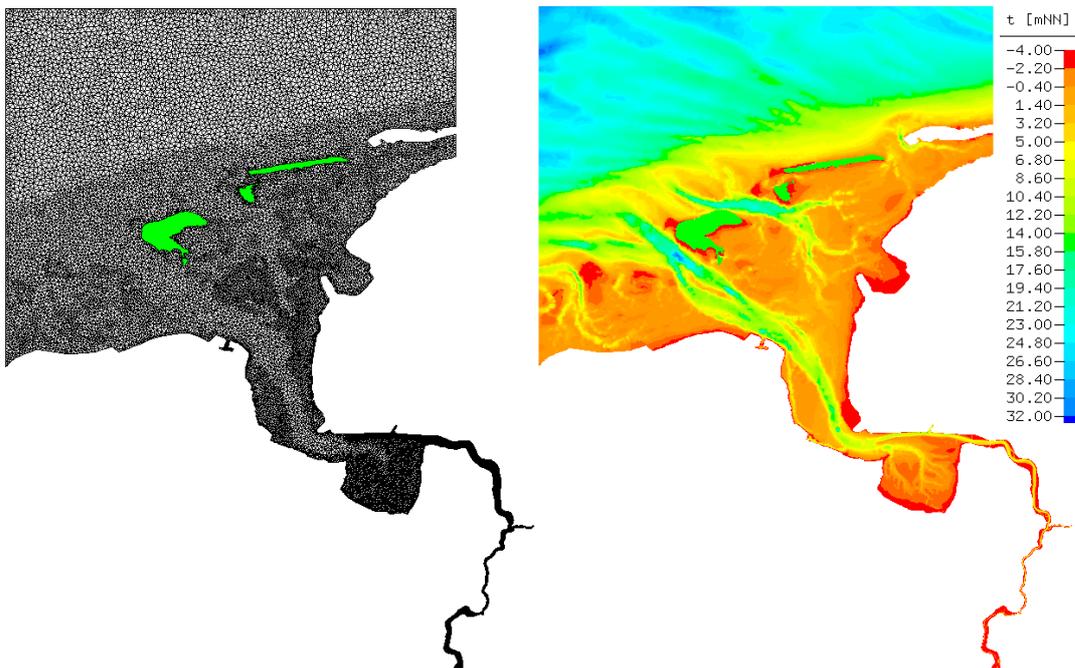


Abbildung 3: Gebietsmodell und Tiefenverteilung des EMS Models.

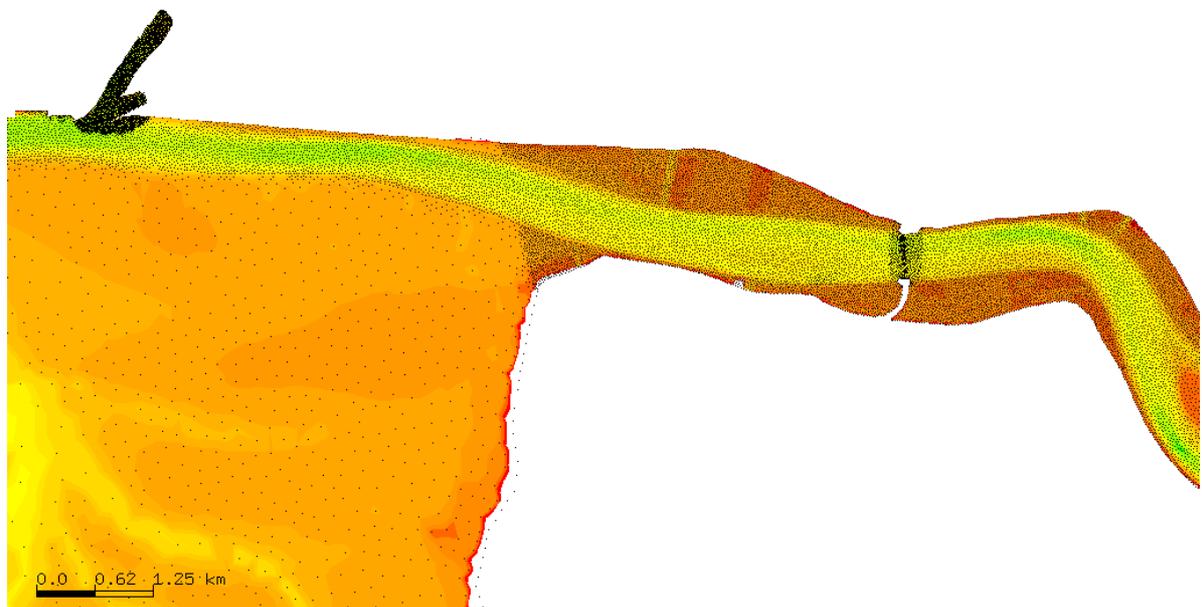


Abbildung 4:Detail Dollar, Hafen Emden und EMS Sperrwerk.

2.1.5 Anwendungen der Modelle

Die erweiterten hydrodynamischen Modelle wurden in verschiedenen Testfällen angewendet und das FLMUD Module wurde im wesentlichen quantitativ validiert. Mit beiden Modellen wurden sehr gute Erfahrungen gemacht bzgl. der implementierten numerischen Verfahren und ihrer Stabilität und Effizienz. Im nachfolgenden sind einige Ergebnisse der konzipierten Testfälle dargestellt und diskutiert.

2.1.5.1 Stabile Schichtung und vollständige Durchmischung

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. 5 a-e ist von links nach rechts, das Geschwindigkeitsprofil, die Suspensionskonzentration, turbulente kinetische Viskosität, turbulente kinetische Energie und die zugehörige Dissipation, von oben nach unten charakteristische Zeitpunkte der Lösung.

Die numerischen Experimente wurden in einem Versuchsgerinne durchgeführt, das 60 km lang ist, 10m tief und 800 m breit. Es werden im ersten Experiment (Abb. 5) zunächst 5g/l Flüssigschlick injiziert. Der Flockendurchmesser beträgt hier 6 μm und die Sinkgeschwindigkeit ergibt sich aus Gl. 24.

Wie in Abb. 5a ersichtlich ist entsteht eine Lutokline mit entsprechender Schichtung. Maßgebend ist hier, dass die Flüssigschlickschicht in Bewegung gerät und ebenfalls unterhalb der Lutokline ein turbulentes Regime entwickelt, welches dann letztendlich zur vollständigen 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.

Im weiteren wurde, dasselbe Experiment durchgeführt jedoch mit einer Injektion von 500g/l (Abb. 6. a-g). Hier ist der Turbulenzkollaps in der Flüssigschlickschicht zu erwarten, was auch in den Ergebnissen deutlich wird.

Zunächst entwickelt sich eine stark ausgeprägte Lutocline Schichtung, wobei im Weiteren in der Schlickschicht viskoses Fließen einsetzt und die Turbulenz komplett gedämpft wird. Im weiteren Verlauf der Simulation entwickelt sich dann über der Schlickschicht ein logarithmisches Geschwindigkeitsprofil. Es ist deutlich, dass mit den entsprechenden numerischen Verfahren die Grundsätzlich unterschiedlichen Fließregime im selben Kontinuum abgebildet werden können. Ein Modell, welches diesen Übergang zwischen viskosen Fließen und isotroper Turbulenz numerisch nicht abbilden kann, versagt hier.

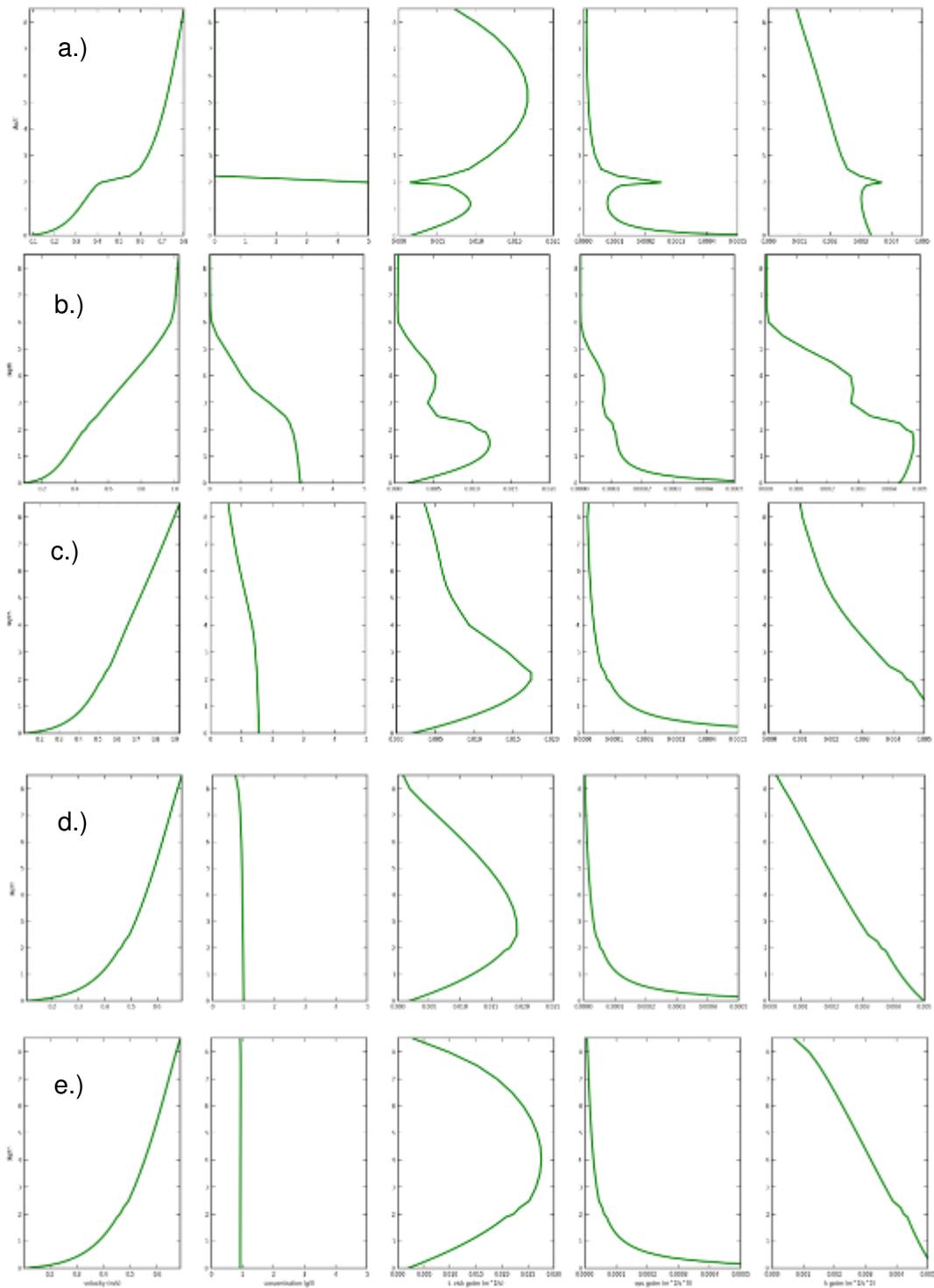
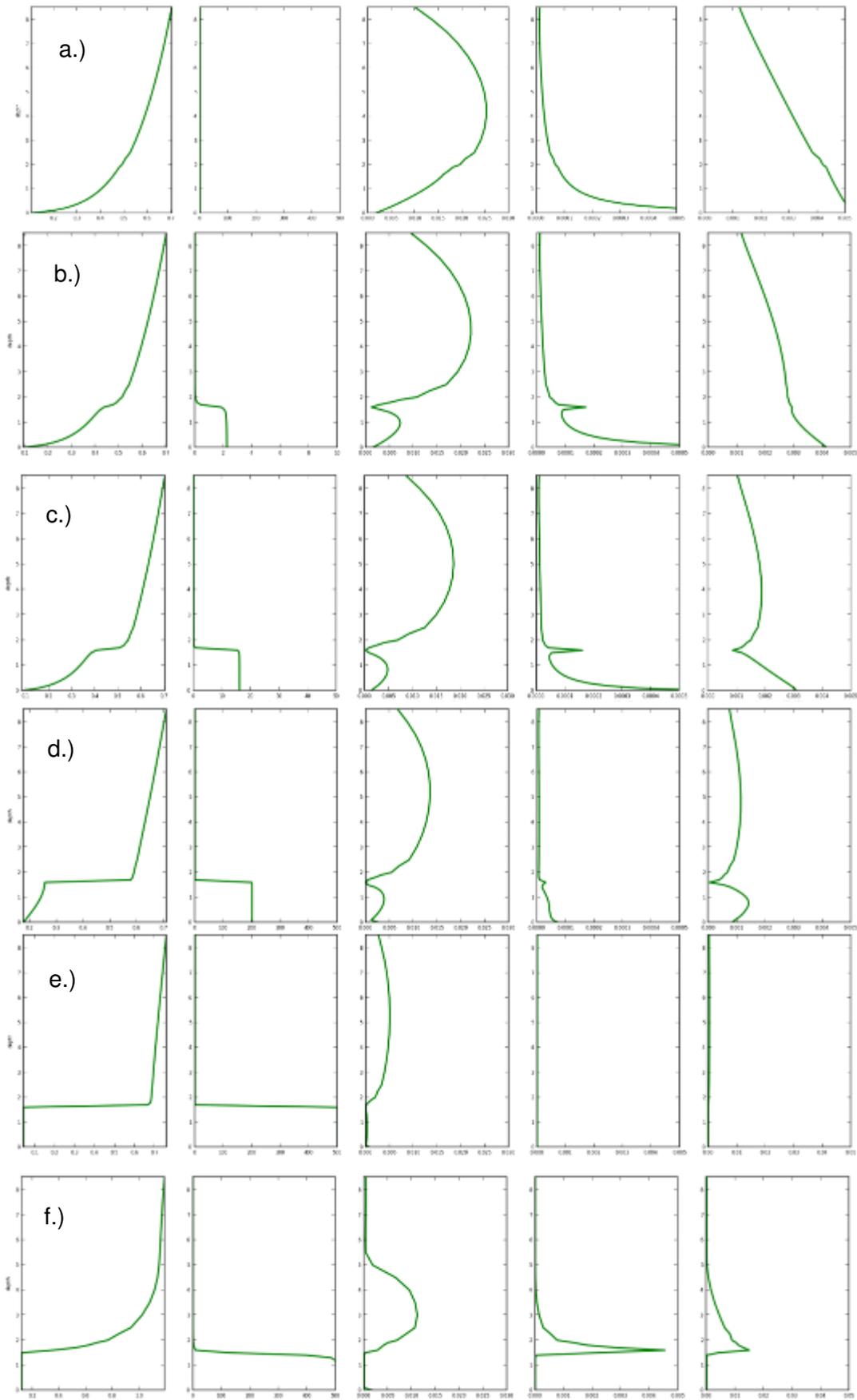


Abbildung 5: Zeitliche Abfolge (vertikal) der Ergebnisse bei einer Injektion von 5g/l im Versuchsgerinne. Die Spalten von links nach rechts, Geschwindigkeitsprofil, Suspensionskonzentration, turbulente Viskosität, Produktion von turbulenter kinetischer Energie und die zugehörige Dissipation von turbulenter kinetischer Energie.



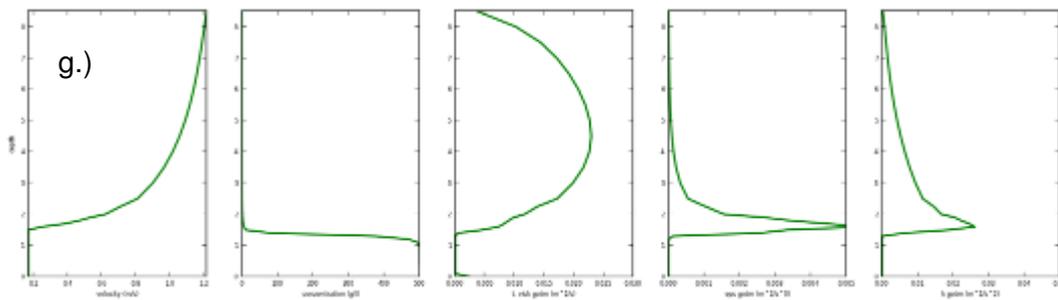


Abbildung 6: Zeitliche Sequenz (vertikal) der Ergebnisse bei einer Injektion von 500g/l im Versuchsgerinne. Die Spalten von links nach rechts zeigen, das Geschwindigkeitsprofil, die Suspensionskonzentrationsverteilung, die turbulente Viskosität, die Produktion von turbulenter kinetischer Energie und die zugehörige Dissipation.

2.1.5.2 Gravitationsbedingtes fließen von Flüssigschlick

Um die Fähigkeit des Modells, gravitationsbedingten Transport von hochkonzentrierten Suspensionen abzubilden, zu testen, wurde ein einfaches Gebietsmodell aufgebaut (s. Abb. 7.), welches eine Flussmündung darstellt. Der Fluss führt hohe Sedimentkonzentrationen mit sich und mündet in einem Becken. Der Zufluss beträgt $1\text{m}^3/\text{s}$ und die Suspensionskonzentration ist am Rand konstant über die Wassertiefe verteilt mit 1g/l . Die Momentaufnahmen des Ausbreitungsvorganges sind ohne (A) und (B) mit der -FLMUD Bibliothek. Die vertikale Diskretisierung ist mit grauen Linien dargestellt. Die Ergebnisse zeigen deutlich

- den Einfluss der zusätzlichen Terme in der Impulsgleichung,
- die Fähigkeit des numerischen Modells hohe Konzentrationsgradienten abzubilden und
- die numerische Stabilität des Verfahrens.

Es wird deutlich, dass das Advektionsverfahren höherer Ordnung, selbst bei einfacher vertikaler Diskretisierung, das gravitationsbedingte Fließen scharf abbilden kann (s. Abb. 8). Die Ergebnisse in der Draufsicht sind in Abb. 8 dargestellt.

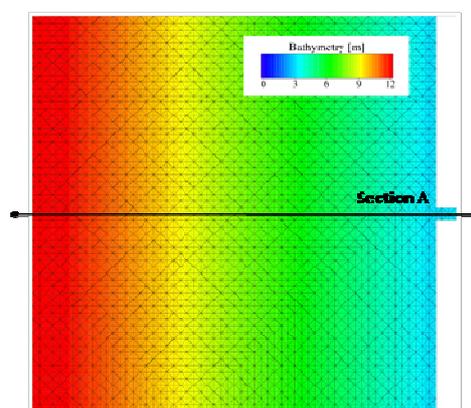


Abbildung 7: Draufsicht auf das Testgebiet

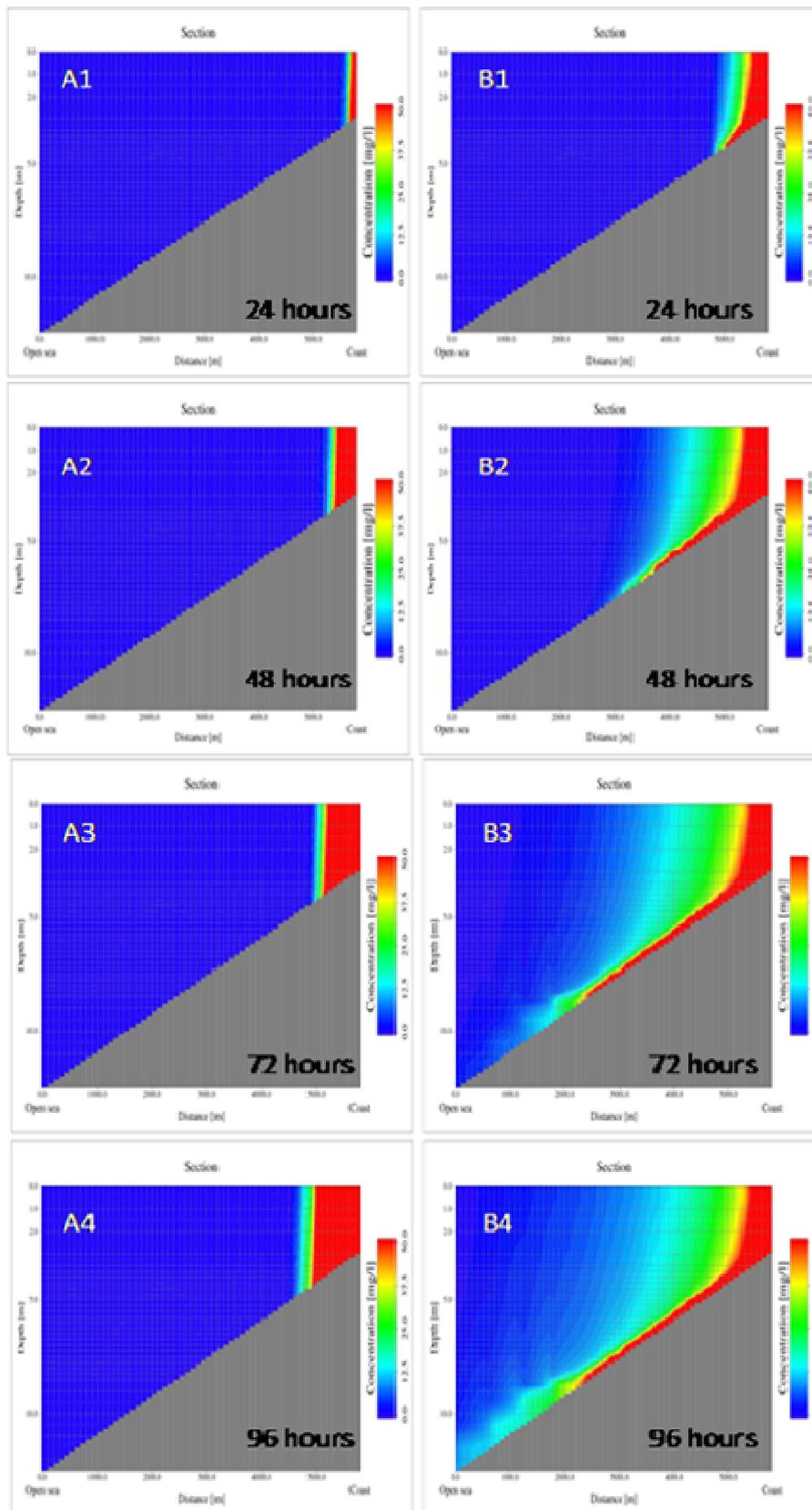


Abbildung 8: Querschnitt und zeitliche Entwicklung von Flüssigschlick ohne (links) und mit (rechts) Flüssigschlickmodul

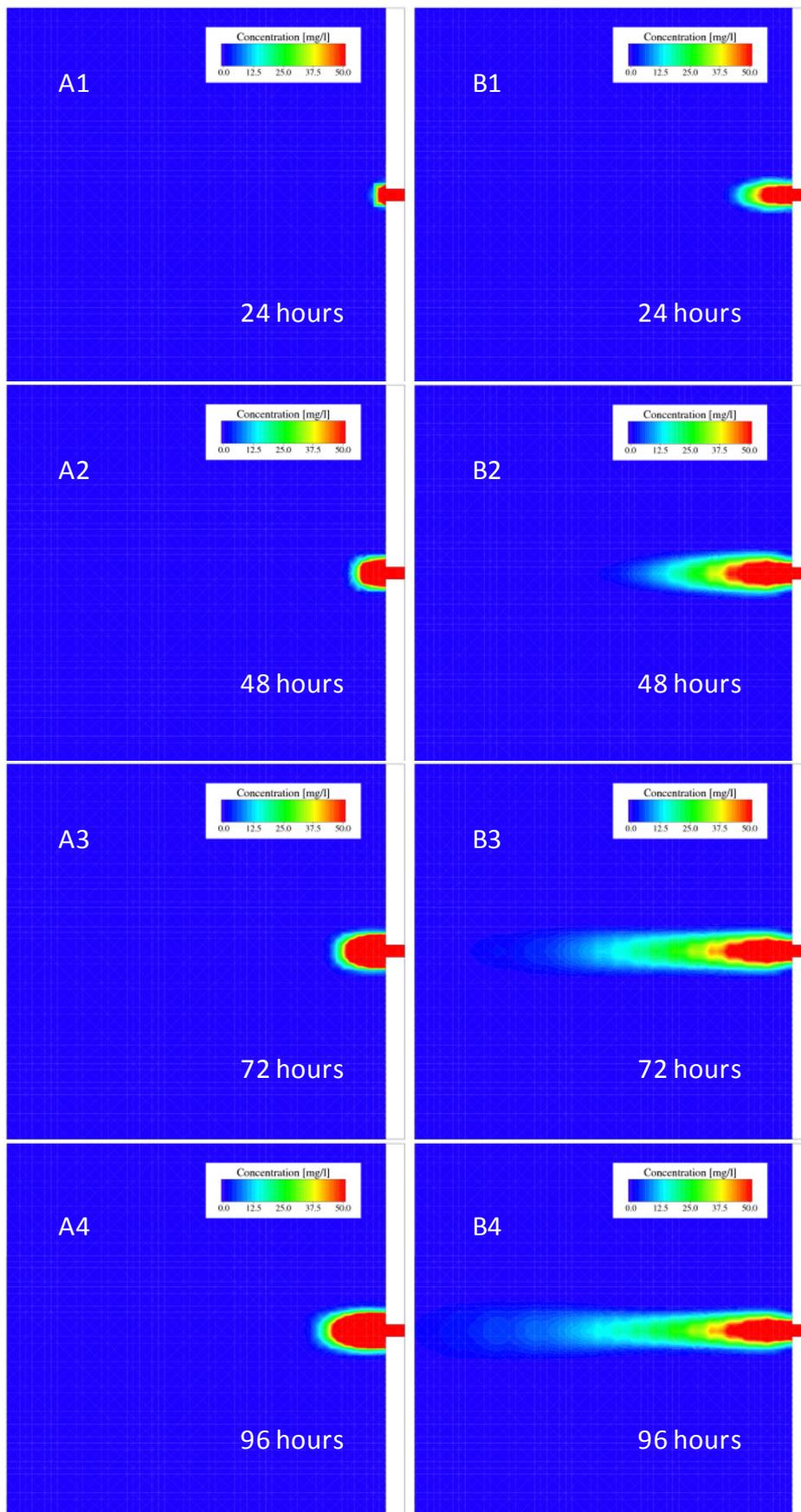


Abbildung 9: Draufsicht und zeitliche Entwicklung von Flüssigschlick ohne (links) und mit (rechts) Flüssigschlickmodul.

2.1.5.4 Erste Anwendungen an der EMS

Die ersten Anwendungen an der EMS haben wir mit dem SELFE-FLMUD Model unternommen, da dieses vollständig parallelisiert ist. Mit der Domänendekompositionsmethode wird es möglich, das gesamte Gebiet der Ems in kurzer Zeit zu simulieren.

Hierbei wird das Gebiet in Teilgebiete zerlegt, wobei die Anzahl der Nachbarknoten der Teilgebiete, zwecks reduzierter Netzwerkkommunikation, minimiert wird. Dies wird mit ParMetis erzielt (s. Abb 9).

IN

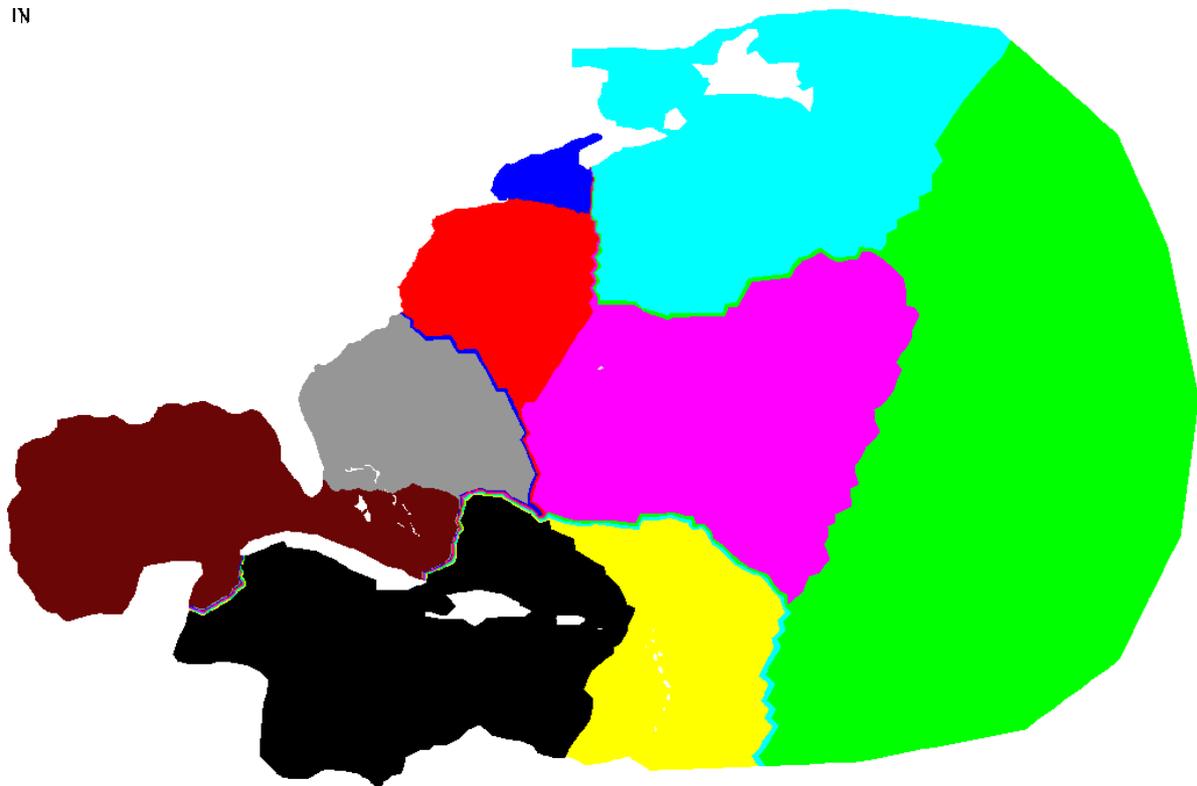


Abbildung 10: Beispiel einer Domänendekomposition an der Sargasso See.

Das Rechnetz entspricht dem in Abb. 3 und 4 und hat 112.342 Knoten, die Rechenzeit auf 256 Rechenkernen bei 7 Tiden beträgt ca. 5 Stunden. Das Model hat 31 Schichten im S-Koordinatensystem (s. Zhang et al. 2007). Der Rechenzeitschritt beträgt 20s, wobei die kleinste Kantenlänge am Sperrwerk weniger als 5m beträgt. Es wurde vereinfacht eine M2-Tide am Rand eingesteuert.

Die unten dargestellten Ergebnisse zeigen die Entwicklung der Schlickschicht sowie die partielle Durchmischung im zeitlichen Verlauf der Tide.

In Abb. 11 sieht man die zeitliche Entwicklung der Schlickschicht an der Sohle auf Grundlage der oben beschriebenen Randbedingungen. Die Skale gibt die Dichte an.

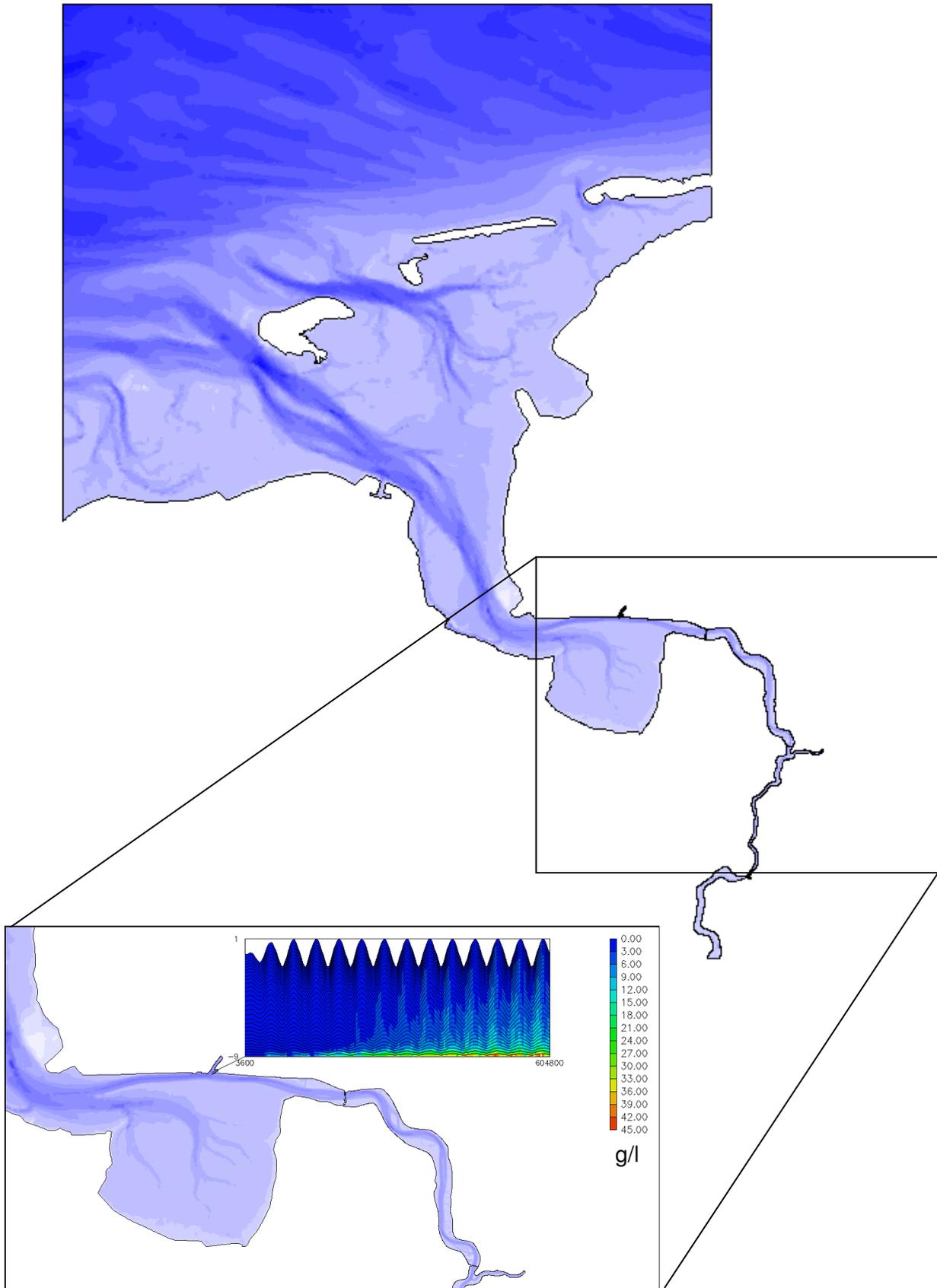


Abbildung 11: Erste Ergebnisse an der EMS mit SELFE. Entwicklung der Schlickschicht im Hafen Emden. Anfangszustand war eine Konzentration von 1g/l vollständig durchmischt über die gesamte Wassersäule.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Rahmen der Durchführung des Projektes sind Kosten in Form von Personalkosten, Reisekosten und Materialkosten entstanden. Die entsprechenden Kosten sind im Detail im Verwendungsnachweis dargestellt.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der Verlauf des Vorhabens folgte der im Projektantrag erläuterten Planung. Lediglich die endgültige Validierung ist auf Grundlage der weitaus komplexeren Implementierung in nunmehr zwei weit verbreitete Modellumgebungen sowie durch Probleme bei der Turbulenzmodellierung (s. letzter Zwischenbericht), weniger aufwendig ausgefallen als im eigentlichen Antrag eingeschätzt. Es ist jedoch sichergestellt, dass dieser Teil in den geplanten Veröffentlichungen berücksichtigt wird.

2.4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

2.4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Das hier durchgeführte Projekt zielte auf das bessere Verständnis der im Ästuar zu beobachtenden Prozesse und Wirkzusammenhänge der Flüssigschlickdynamik ab welche bis heute nicht vollständig verstanden sind. Dies geht direkt mit den Forschungszielen des KFKI einher. Zum besseren Verständnis der involvierten physikalischen Prozesse, sollten weitere Untersuchungen mit den nun entwickelten Modellen folgen. Die Grundlage ist gegeben und es ist sichergestellt, dass die geleistete Arbeit im Rahmen dieses Vorhabens an den jeweiligen Institutionen, mit denen kooperiert wurde, Anwendung findet.

Dem hier entwickelten Modul kommt in der Praxis längerfristig die Funktion eines Ingenieurwerkzeuges zur Untersuchung und Prognose der Flüssigschlickdynamik unter den komplexen Bedingungen in Ästuaren zu.

Hierzu zählen z.B.:

- die Untersuchung und Bewertung von Naßbaggerkonzepten zur Fahrrinnen- oder Hafenunterhaltung im Sinne eines großräumigen Sedimentmanagements,
- die Optimierung des Schleusenbetriebs und der technischen Ausführung von Schleusen an Ästuaren,
- die Untersuchung und Prognose von alternativen Unterhaltungskonzepten sowie
- die Ausbreitung von Schadstoffen.

Es ist daher durch die Verfügbarkeit einer solchen Simulationstechnik von einer Stärkung des Wirtschaftsstandortes Deutschland auszugehen. Da die Unterhaltungsproblematik

weltweit in vielen Häfen gegeben ist, kann ebenfalls von erheblichem internationalem Interesse an dem hier auszuarbeitenden Wissen und Modell ausgegangen werden.

Ein Interesse an den Ergebnissen dieser Forschung ist daher sowohl bei den Betreibern von Häfen und Wasserstraßen, wasserbaulichen Ingenieurbüros als auch in der Naßbaggerindustrie zu erwarten. Diese Gruppen kommen ebenfalls als spätere Nutzer der zu entwickelnden Technologie in Betracht.

2.4.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Die wissenschaftlichen und technischen Erfolgsaussichten bestehen darin, das im Rahmen des Projektes erarbeitete Fachwissen sowie die auf Basis weiterer Modellierungen erarbeiteten Zusammenhänge sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Betreibern von Häfen und Wasserstraßen zugänglich zu machen. Dies ist nicht zuletzt eines der Anliegen der projektbegleitenden Gruppe.

Im Rahmen dieses Vorhabens ist jedoch eine weitere Verbreitung in jeden Falle sichergestellt. So werden die folgenden Stellen das FLMUD nutzen:

- IFREMER, Brest, Frankreich
- Univ. La Rochelle, Frankreich
- Virginia Institute of Marine Sciences, USA
- Oregon State and Health University, USA
- ISMAR-CNR, Venedig
- Forschungsstelle Küste Norderney
- Institut Ruder Boskovic, Zagreb, Kroatien

Des Weiteren besteht jetzt schon eine große Anzahl von Nutzern der Modelle

- SELFE (<http://www.stccmop.org/CORIE/modeling/selfe/>) und
- SHYFEM (<https://sites.google.com/site/shyfem/home>)

an die FLMUD gekoppelt wurde. Die Verbreitung als freie Software schafft die Grundlage für die Verbreitung, Weiterverwendung und Weiterentwicklung des in diesem Vorhaben entstandenen FLMUD-Moduls.

Im wissenschaftlichen Sinne ist die Interaktion zwischen Strömung, Seegang und Schlick von großem Interesse. Der Verfasser hat hierzu im Rahmen dieses Vorhabens ebenfalls die Grundlage geschaffen.

2.4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Da die jetzt durchgeführte Phase die effizienten simulationstechnischen Voraussetzungen zur Beurteilung bzw. Simulation der Flüssigschlickdynamik geschaffen hat, ist im Anschluß eine Projektphase zur weiteren Anwendung, Validierung und Veröffentlichung quantitativer Ergebnisse. Der Zeithorizont, für die Einführung als Softwareprodukt liegt mithin im Rahmen von 1 bis 2 Jahren nach Abschluss des aktuellen Vorhabens. Zur Forcierung einer späteren weitergehenden Nutzung sind daher verschiedene Wege vorgesehen:

- Anwendung des am Institut für Wasserbau der Technischen Universität Darmstadt entwickelten numerischen Simulationsmodells im Rahmen von Ingenieurpraktischer Unterstützung von Hafenbetreibern.
- Offenlegung des Modellteiles zur Kinematik des Flüssigschlicks im Internet im Rahmen von SHYFEM und SELFE.
- Beratung und Zusammenarbeit mit Partnern und Anwendern dieser Modelle.
- Eine Reihe von wissenschaftlichen Veröffentlichungen.

2.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

An der Universität für Bundeswehr wurde im Gegensatz zu dem hier vorgestellten kontinuierlichen Ansatz der eines isopyknischen Modells verfolgt. Die Ansätze unterscheiden grundsätzlich und haben verschiedene Vorteile und Nachteile.

Begrüßenswert wäre ein weiteres Forschungsvorhaben, wo beide Stellen eng zusammenarbeiten, um das Beste aus den Erfahrungen der jeweiligen Vorhaben zu machen.

2.6 Geplante und erfolgte Veröffentlichungen

Im Rahmen des Vorhabens sind bisher folgende Veröffentlichungen eingereicht worden:

- 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.
- Ferrarin, C., Bajo, M., Roland, A., Umgiesser, G., Cucco, A., Davolio, S., Buzzi, A., Malguzzi, P., Drogada, O., "Tide-surge-wave modelling and forecasting in the Mediterranean Sea with focus on the Italian coast", Ocean Modelling, under review.
- The Po river plume modeling: state of art and new modeling tools for hydrodynamic studies in deltas, Debora Bellafiore, C. Ferrarin, A. Roland, M. Ravaioli, A. Russo, G.

Bortoluzzi, G. Umgiesser. PECS – Physics of Estuaries and Coastal Seas Conference, 13-16th August 2012, New York

Geplante Veröffentlichungen:

Roland, A. und Zanke, U. 2012, „Flüssigschlick“, Erweiterung eines morphodynamisch numerischen Simulationsmodells zur Simulation der Dynamik von Flüssigschlick im Bereich der deutschen Nordseeküste und angrenzenden Ästuaren und Tideflüssen, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft an der Technischen Universität Darmstadt.

Aus der o.a. Institutsveröffentlichungen werden dann Teile in den entsprechenden Internationalen Fachzeitschriften ausgegliedert werden. Eine Veröffentlichung in der HANSA ist ebenfalls vorgesehen. Weiterhin sollen die Ergebnisse auf dem Jährlichen KFKI Workshop dieses Jahres (November, 2012) vorgestellt werden.

3. Erfolgskontrollbericht (nicht öffentlicher Teil)

Literatur:

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

Debora Bellafiore, C. Ferrarin, A. Roland, M. Ravaioli, A. Russo, G. Bortoluzzi, G. Umgiesser The Po river plume modeling: state of art and new modeling tools for hydrodynamic studies in deltas,. PECS – Physics of Estuaries and Coastal Seas Conference, 13-16th August 2012, New York

- 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., Malguzzid, P., Drofad, O., “Tide-surge-wave modelling and forecasting in the Mediterranean Sea with focus on the Italian coast”, *Ocean Modelling*, under review.
- Ferry, J., and S. Balachandar, 2001, A fast Eulerian method for disperse two-phase flow, *Int. J. Multiphase Flow*, 27, 1199– 1226, doi:10.1016/S0301-9322(00)00069-0.
- Harten, A (1983), "High resolution schemes for hyperbolic conservation laws", *J. Comput. Phys.* 49 (2): 357–393, doi:10.1006/jcph.1997.5713
- Hsu, T.-J., P. A. Traykovski, and G. C. Kineke, 2007, On modeling boundary layer and gravity-driven fluid mud transport, *J. Geophys. Res.*, 112, C04011, doi:10.1029/2006JC003719
- Hsu, T.-J., Ozdemir, C. E., Traykovski P. A., 2009, High resolution numerical modeling of wave-supported gravity-driven fluid mud transport, *J. Geophysical Res.*, 114, C05014, doi:10.1029/2008JC005006.
- Gill, A., 1982, *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academic Press, New York
- Kantha, L.H., Clayson, C.A., 1994. An improved mixed layer model for geophysical applications. *J. Geophys. Res.* 99 (25), 235–266.
- Khelifa A, Hill PS, 2006, Models for effective density and settling velocity of flocs. *J Hydraul Res* 44(3):390–401.
- Kranenburg, C. (1994), The fractal structure of cohesive sediment aggregates, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 39, 451– 460.
- Lazure, P., Dumas, F., 2008. An external-internal mode coupling for a 3d hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Adv. Water Resources* 31, 233, 250.
- Lazure Pascal, Garnier Valerie, Dumas Franck, Herry Christelle, Chifflet Marina (2009). Development of a hydrodynamic model of the Bay of Biscay. Validation of hydrology. *Continental Shelf Research*, 29(8), 985-997. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2008.12.017>
- 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.
- Malcherek, A.; 2010, Zur Beschreibung der rheologischen Eigenschaften von Flügelschlickens aus: *Die Küste* 2010, Nr.77 Abb.,Tab.,Lit. S.135-178 ISSN 0452-7739
- Mewis, P, 2004 *Morphodynamisch-numerische Modellierung von Flußkurven*.Techn. Univ., Fachber. Bauingenieurwesen und Geodäsie , Darmstadt, Dissertation
- Umlauf, L., Burchard, H., 2003. A generic length-scale equation for geophysical turbulence models. *J. Mar. Res.* 6, 235–265.
- Nasner, H.; Pieper, 2009, R, 03KIS051, *FluMu Eigenschaften und Verhalten von Fluid-Mud in Brackwasserhäfen*, Endbericht, KFKI,
- 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.
- Shu, C.-W., Osher, S., 1989: „Efficient implementation of essentially non-oscillatory shock-capturing schemes, II“, Journal of Computational Physics, Vol. 83, 32-78
- Toorman, E., 1997, Modelling the thixotropic behaviour of dense cohesive sediment suspensions, Rheologica Acta 36: 56-65
- Toorman, E.A., A.W. Bruens, C. Kranenburg & J.C. Winterwerp, 2002. Interaction of suspended cohesive sediment and turbulence. In: Proceedings in Marine Science, Vol.5: Fine Sediment Dynamics in the Marine Environment (J.C. Winterwerp & C. Kranenburg), pp.7-23, Elsevier Science, Amsterdam.
- Oberrecht, D., 2009: Rheologische Analyse von Flüssigschlicksuspension aus unterschiedlichen Lokationen entlang der Ems, Bachelorarbeit am Franzius-Institut, TU Hannover.
- 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.
- Verney R, Lafite R, Brun-Cottan J.C, Le Hir, P (2011). Behaviour of a floc population during a tidal cycle: laboratory experiments and numerical modelling. Continental Shelf Research, 31(10), S64-S83. Publisher's official version : <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2010.02.005>
- Worrall, WE., Tuliani, S.,1964 Viscosity changes during the ageing of clay-water suspensions. Trans Br Ceram Soc, 63:167±185
- Wurpts, R., 2005, Hyperconcentrated flow, Hansa International Maritime Journal
- Wurpts, A.; 2006, Numerische Simulation von Dichteeffekten am Beispiel der Umlagerung von Baggergut im Ästuarbereich: Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Darmstadt; 140, Selbstverlag 2006, Abb.,Tab.,Lit.X,129 S.
- Yanenko,N.N.(1971),The method of fractional steps.Springer-Verlag.
- Zhang, Y.-L. and Baptista, A.M. 2008 "SELFIE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation", Ocean Modelling, 21(3-4), 71-96.