## Modellierung der Morphodynamik von Schlick in Tideflüssen und Ästuaren

# BMBF 03KIS065



Dr.-Ing. Aron Roland (TUD, IWW)

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Zanke (TUD, IWW)

## Übersicht

- Rekapitulation der Grundlagen
- Eingesetzte Modelle
  - SHYFEM
  - SELFE
- Erzielte Ergebnisse
  - Testfälle
    - Stabile Schichtung und vollständige Durchmischung
    - Gravitationsbedingter Transport
  - Erste Berechnungsergebnisse an der Ems
- Probleme und Forschungsbedarf
- Weitere Arbeiten
- Zusammenfassung und Ausblick

# Die Flüssigschlickdynamik

#### Theoretische Grundlangen



- Erhaltungsgleichungen:
  - Zwei-phasen Fluid-Sediment Interaktion …
  - Vereinfachungen …
  - Kontinuierlicher prozessorientierter Ansatz.
- Einspeisung der Materialeigenschaften:
  - Rheologische Eigenschaften von Schlick
  - Strukturverhalten, hysterese nach Toorman
  - Einfluss auf die Turbulenz nach Toorman
  - Erosion und Aufwirbelung (verschiedene Ansätze)
  - Konsolidierung (in Arbeit)
  - Flockenbildung und Flockendynamik (Implemetierung des Models FLOCMOD in Kooperation mit IFREMER und ISMAR-CNR; aktuell nach Winterwerp, 1998)

### Zwei-phasen Fluid-Sediment Interaktion

On two-phase sediment transport:sheet flow of massive particles Hsu et al. 2004; JRS

#### Kontinuität: Fluid

$$\rho^{f} \left[ \frac{\partial \left( 1 - \bar{\phi} \right)}{\partial t} + \frac{\partial \left( 1 - \bar{\phi} \right) \bar{w}^{f}}{\partial z} \right] = 0$$

$$\rho^{s}\left[\frac{\partial\bar{\phi}}{\partial t} + \frac{\partial\bar{\phi}\bar{w}^{s}}{\partial z}\right] = 0$$

#### Impulserhaltung:



## **Zwei-phasen Fluid-Sediment Interaktion**

On two-phase sediment transport: sheet flow of massive particles Hsu et al. 2004; JRS

Turbulenz mit Berücksichtigung der Partikel-Strömungsinteraktion und der Turbulenzdämpfung:

Turbulente kinetische Energie k:

$$(1-\phi)\frac{\partial k}{\partial t} = \nu_t \left[ \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}\right) \frac{\partial (1-\phi)k}{\partial z} \right] \\ - (1-\phi)\varepsilon + (s-1)g\frac{\nu_t}{\sigma_c}\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{2\phi sk}{T_p + T_L}$$

Dissipation der kinetischen Energie ε:

$$(1-\phi)\frac{\partial\varepsilon}{\partial t} = C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\nu_t \left[ \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_{\varepsilon}}\right)\frac{\partial(1-\phi)\varepsilon}{\partial z} \right] - C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k}(1-\phi) + C_{\varepsilon 3}\frac{\varepsilon}{k} \left[ (s-1)g\frac{\nu_t}{\sigma_c}\frac{\partial\phi}{\partial z} - \frac{2\phi sk}{T_p + T_L} \right].$$

## Einspeisung geringer Schlupf ...

Fast Equilibrium Eulerian Approach, Ferry & Balachandar (2001) IJMF

- Wesentliche Vereinfachung erfolgt mit der Annahme von
  - geringem Schlupf zwischen Partikeln und Strömung ( $\tau \ll 1$ ;  $\tau = T_p \sim D^2 \rho_s$ )



#### Weitere Annahmen - Boussinesq "Dichte"

*Théorie de l'écoulement tourbillonnant et tumultueux des liquides dans les lits rectilignes a grande section (1897)* 

 Die Annahme von Boussinesq bzgl. des Dichtegradienten geht davon aus, dass der Dichtegradient vernachlässigbar und der Dichteunterschied geht lediglich über u.a. Gravitationsanteil in die Impulsgleichungen ein.

$$g' = g \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho}.$$



Weitere Annahmen - Boussinesq "turbulente Viskosität" "Essai sur la théorie des eaux courantes", Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des Sciences (1887)

 Weiterhin führen wir das "Eddy Viscosity" Konzept nach Boussinesq ein.

$$-\overline{\upsilon_i'\upsilon_j'} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{\upsilon}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\upsilon}_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3} \left(K + \nu_t \frac{\partial \bar{\upsilon}_k}{\partial x_k}\right) \delta_{ij}$$

 Wir nehmen an, wie Le Hir et al. 2001, dass wir die Strukturviskosität zu der turbulenten Viskosität hinzuaddieren können.

$$v_{app} = v_{mud} + v_f + v_{visc} + v_{waves}$$



 $v_{app} = v + v_f$ 

# Einspeisung – Rheologie (Le Hir)

High-resolution numerical modeling of wave-supported gravity-driven mudflows, Hsu et al. (2009), JGR Oceans

$$\tau_{xz}^{s} = \rho^{f} v_{s} \frac{\partial u}{\partial z}$$
$$v_{s} = v_{s0} \phi^{k_{a}} \left[ 1 + \frac{\gamma_{0}}{k_{b} \gamma_{0} + |\partial u/\partial z|} \right]$$

Le Hir et al.,2001

Wenig abgesichert, letztendlich sind Messungen notwendig!

Rheologische Eigenschaften Einfluss auf die Turbulenz Erosion und Aron Foulf, Wir beitung Andreas Wurpts





## Einspeisung – Rheologie + Strukturverhalten (Worrall und Tuliani + Toorman nach Brenda, 2008)



$$\begin{aligned} \tau &= \tau_y + \mu_\infty D + \frac{(\mu_0 - \mu_\infty)D}{1 + \frac{(\mu_0 - \mu_\infty)D}{\tau_B - \tau_y}} \\ \mu &= \frac{\partial \tau}{\partial D} = \mu_\infty + \frac{(\mu_0 - \mu_\infty)\left(1 + \frac{(\mu_0 - \mu_\infty)D}{\tau_B - \tau_y}\right) - \frac{(\mu_0 - \mu_\infty)^2 D}{\tau_B - \tau_y}}{\left(1 + \frac{(\mu_0 - \mu_\infty)D}{\tau_B - \tau_y}\right)^2} \\ \mu &= \frac{\partial \tau}{\partial D} = \mu_\infty + \frac{(\mu_0 - \mu_\infty)(\lambda + D\lambda')\left(1 + \frac{(\mu_0 - \mu_\infty)D}{\tau_B - \tau_y}\right) - \frac{(\mu_0 - \mu_\infty)^2 D\lambda}{\tau_B - \tau_y}}{\left(1 + \frac{(\mu_0 - \mu_\infty)D}{\tau_B - \tau_y}\right)^2} \\ \lambda' &= \frac{\lambda_t - \lambda_{t-\Delta t}}{D_t - D_{t-\Delta t}} \end{aligned}$$

**Rheologische Eigenschaften** 

Einfluss auf die Turbulenz Erosion und Aufwirbelung Flockendynamik

Numerisches Problem wenn tatsächliche Schubspannung kleiner als die Kohäsion.

Dann ist die Scherrate = 0! ... Beispiel später!

...

## Einspeisung – Rheologie + Strukturverhalten (Entgültiges Modell basierend auf Daten, Roland, 2012)



### Einspeisung – Rheologie + Strukturverhalten (Entgültiges Modell basierend auf Daten)



### Einspeisung – Rheologie + Strukturverhalten (Entgültiges Modell basierend auf Daten)



#### Einspeisung – Rheologie + Strukturverhalten (Entgültiges Modell basierend auf Daten)



#### **Scatterplots**





#### **Eingesetzte Modelle – SHYFEM - Kassandra**



#### **SHYFEM - Kassandra**



#### **Validation SELFE-WWMII**



#### Validation SELFE-WWMII



Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft | 20

#### Scaling - SELFE-WWMII (c1a, ECMWF)



Aron Roland, Ulrich Zanke und Andreas Wurpts

#### Grundgleichungen der Strömungsmodelle

Konti

$$\nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Impuls

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left( v \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \right) - g \nabla \eta + \mathbf{F}; \qquad \mathbf{F} = \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) - f \mathbf{k} \times \mathbf{u} - \frac{1}{\rho_0} \nabla p_A + \alpha g \nabla \varphi + \mathbf{R}_s$$

Turbulenz (GLM nach Burkhard et al.)

$$\frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial} \left( v_k^{\psi} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + vM_t + \mu N_t^2 - \varepsilon$$
$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial}{\partial} \left( v_{\psi} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\psi}{k} \left( c_{\psi 1} M_t^2 + c_{\psi 3} \mu N_t^2 - c_{\psi 2} \varepsilon \right)$$

#### Transportgleichungen in 3d ...

#### Salinität

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial t} + \mathbf{u}\nabla S + \nabla \left(D_h \nabla S\right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial S}{\partial z}\right)$$

Temperatur

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

Konzentration

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

Flokkulation

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\partial D}{\partial t} + \mathbf{u}\nabla D + \nabla \left(D_{h}\nabla D\right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{v}\frac{\partial D}{\partial z}\right) \frac{\dot{\gamma}D_{p}^{\ \beta}}{\beta\ln\frac{D}{D_{p}} + 1} \left[\frac{c}{3\rho_{s}}k_{A}^{\prime}D_{p}^{\ n_{f}-3}D^{-n_{f}+4+\beta} - \frac{k_{B}^{\prime}}{3}\left(\frac{v\cdot\dot{\gamma}}{F_{y}}\right)^{0.5}D_{p}^{-1}D^{-\beta+2}\left(D-D_{p}\right)\right]$$

Struktur

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{\partial\lambda}{\partial t} + \mathbf{u}\nabla\lambda + \nabla\left(D_h\nabla\lambda\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_v\frac{\partial\lambda}{\partial z}\right) - \left(a + b\dot{\gamma}\right)\left(\lambda - \lambda_e\right)$$

#### Fluid Mud – the baroclinic forces

- The numerical model has been applied to investigate the effect of the baroclinic forces induced by gradients in the fluid mud concentration.
- The simulation has been carried out on an idealized domain comprising a sloping basin (from 3 to 15 m depth) and a river, which carries the fluid mud, flowing in it.
- The vertical resolution is 1 m in the first 3 meter of water, 0.25 m in between 3.5 and 8.5 m and 1 m from 9 to 15 m.
- At the river side a constant discharge of 1 m/s
- The mud has a settling velocity of 0.14 mm/s and a horizontal diffusion coefficient of 0.2 m<sup>2</sup>/s.
- Mud density has been assumed to be 1440 kg/m<sup>3</sup>.



#### Ergebnisse ... im Schnitt



#### **Ergebnisse - Draufsicht**



#### Sigma-Koordinaten + TVD



#### Grades Teilstück – zyklische Randbedingungen

![](_page_27_Picture_1.jpeg)

![](_page_27_Picture_2.jpeg)

![](_page_28_Figure_1.jpeg)

![](_page_29_Figure_1.jpeg)

![](_page_30_Figure_1.jpeg)

![](_page_31_Figure_1.jpeg)

![](_page_32_Figure_1.jpeg)

![](_page_33_Figure_1.jpeg)

![](_page_34_Figure_1.jpeg)

![](_page_35_Figure_1.jpeg)

![](_page_36_Figure_1.jpeg)

Vollständige Entkopplung!

![](_page_37_Figure_2.jpeg)

Turbulenzkollaps - Laminarisierung?

![](_page_38_Figure_2.jpeg)

Entstehung einer neuen Grenzschicht ...

![](_page_39_Figure_2.jpeg)

Voll ausgebildetes log. Geschw. Profil über der Schlickschicht!

![](_page_40_Figure_2.jpeg)

#### **Nordsee Model**

![](_page_41_Picture_1.jpeg)

#### Weitere Arbeiten – Simulation Flüssigschlickdynamik EMS

![](_page_42_Picture_1.jpeg)

#### Simulation Flüssigschlickdynamik EMS

![](_page_43_Figure_1.jpeg)

# Simulation Flüssigschlickdynamik EMS (5h – 7Tiden, 256 CPU's)

![](_page_44_Figure_1.jpeg)

### **Offene Fragestellungen und Probleme**

- Anlaufzeiten
  - Strömung ~ 2 Tiden
  - Sediment ~ 30 Tiden ?
  - Schlick ~ > XXX Tiden ?
- Fragen:
  - Was sind die charakteristischen Zeitskalen für das Einrechnen?
  - Wie können wir so wie damals Ulrich Zanke (1999) der "vor-korn" erdacht hat ein "vor-Schlick" entwerfen?
- Daten
  - Wir brauchen mehr Schlickproben!
  - Die Probennahme muss normiert werden!

### Zukünftige Arbeiten

- Validierung des Multiflockenmodells nach Vernier et al. in FLMUD.
- Implementierung eines kontinuierlichen Konsolidierungsmodells.
- Entwicklung von "vor-Schlick" …

#### Zukünftige Arbeiten: Einspeisung – Flockendynamik (FLOCMOD) Kooperation IFREMER (Romaric Vernier)

$$\frac{dn_k}{dt} = G_{aggr} + G_{break\_shear} + G_{break\_coll} - L_{aggr} - L_{break\_shear} - L_{break\_coll}$$

![](_page_47_Figure_2.jpeg)

1

#### FLOCMOD – Kontinuierliche Flokkulation

Verney, R., et al., Behaviour of a floc population during a tidal cycle: Laboratory experiments and numerical modelling. Continental Shelf Research (2010), doi:10.1016/j.csr.2010.02.005

![](_page_48_Figure_2.jpeg)

Fig. 3. Management of the newly formed flocs in the size class distribution: concept of continuous flocculation.

### Zusammenfassung

- SHYFEM und SELFE wurde nach dem Stand der Wissenschaft erweitert, um die Flüssigschlickdynamik prozessorientiert zu berücksichtigen
  - Turbulenz (Hsu et al. 2008)
  - Rheologie (Le Hir, Worall & Tulani)
  - Strukturverhalten (Toorman)
  - Seegang (WWMII)
  - Barokline zirkulation
  - Flokkulation (Vernier, 2009, 2010)
- Ohne ein kontinuierliches Turbulenzmodell kann man die Flüssigschlickdynamik nicht naturähnlich simulieren. Flokkulation, Rheologie und Strukturverhalten hängen stark von den Turbulenzcharakteristiken ab.
- Probleme f
  ür eine gro
  ßr

  äumige Simulation sehen im wesentlichen in der Einrechenzeit die nicht absehbar ist im Moment.

#### Ausblick ... "Atmosphere Ocean-Wave Interactions"

![](_page_50_Figure_1.jpeg)

Roland, A., Cavaleri L., Dutour-Sikiric, M. Bertotti, L., and Torrisi., L, 2012, Importance of Wave-Atmosphere Interactions in the LAMI (Limited Area Model Italy), ECMWF Wave Workshop

#### Validation of the PGMCL

![](_page_51_Figure_1.jpeg)

Roland, A., Cavaleri L., Dutour-Sikiric, M. Bertotti, L., and Torrisi., L, 2012, Importance of Wave-Atmosphere Interactions in the LAMI (Limited Area Model Italy), in preparation

#### **Overview – difference in u10 (Coupled – Uncoupled)**

![](_page_52_Figure_1.jpeg)

### **Quantitative Validation Jason 1**

![](_page_53_Figure_1.jpeg)

Aron Roland, Ulrich Zanke und Andreas Wurpts

# Quantitative Validation Jason 2

![](_page_54_Figure_1.jpeg)

Aron Roland, Ulrich Zanke und Andreas Wurpts

#### **Quantitative Validation ERS-2**

![](_page_55_Figure_1.jpeg)

Aron Roland, Ulrich Zanke und Andreas Wurpts

# Quantitative Validation ENVISAT

![](_page_56_Figure_1.jpeg)

Aron Roland, Ulrich Zanke und Andreas Wurpts

# Quantitative Validation ENVISAT

![](_page_57_Figure_1.jpeg)

Aron Roland, Ulrich Zanke und Andreas Wurpts

#### **ASCAT** wind's

![](_page_58_Figure_1.jpeg)

#### In-situ buoys for Waves

![](_page_59_Figure_1.jpeg)

	ME	AE	RMSE	CRMSE	Corr	sci	sciR
Coup	0.11	0.39	0.55	0.54	0.77	0.42	0.42
Uncoup	0.21	0.43	0.62	0.58	0.77	0.48	0.45