

Risks for a regime shift towards hyper-turbid conditions

Auseinandersetzung mit der von
J. C. Winterwerp
vorgetragenen These zum

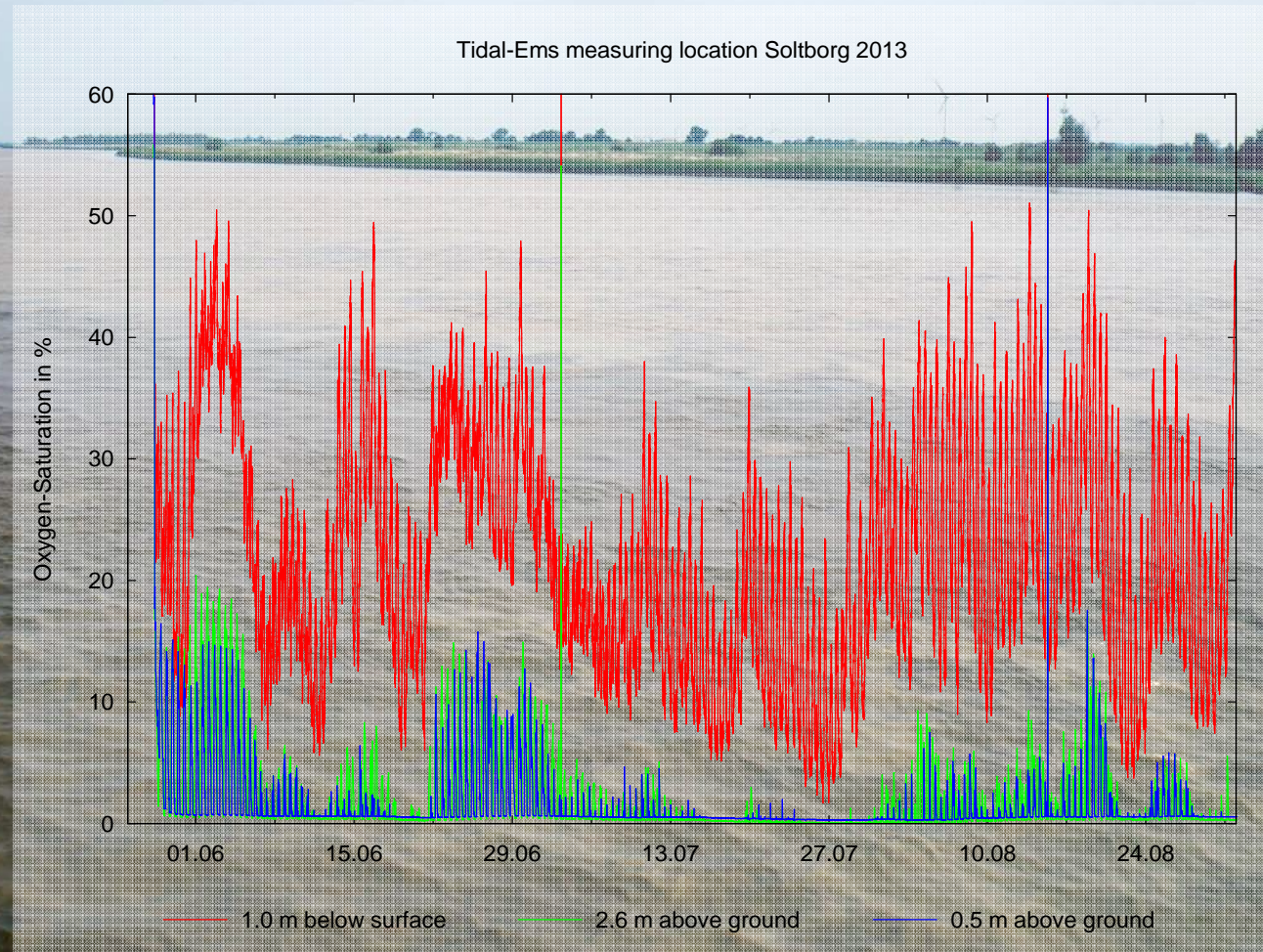
**Umkippen von Ästuaren
in einen stark/übermäßig verschlickten Zustand infolge
von Vertiefung und Einengung.**

Jens Wyrwa, BfG Koblenz, 27. Jan. 2015

Gliederung

1. Problem Verschlickung Tide-Ems
2. Kernaussage
3. Methodenübersicht
4. Analysen und Ergebnisse
5. Kritik der Analysen
6. Einschätzung und Maßnahmenvorschläge
7. Nachbemerkingen: Selbstverstärkung mittels Thixotropie

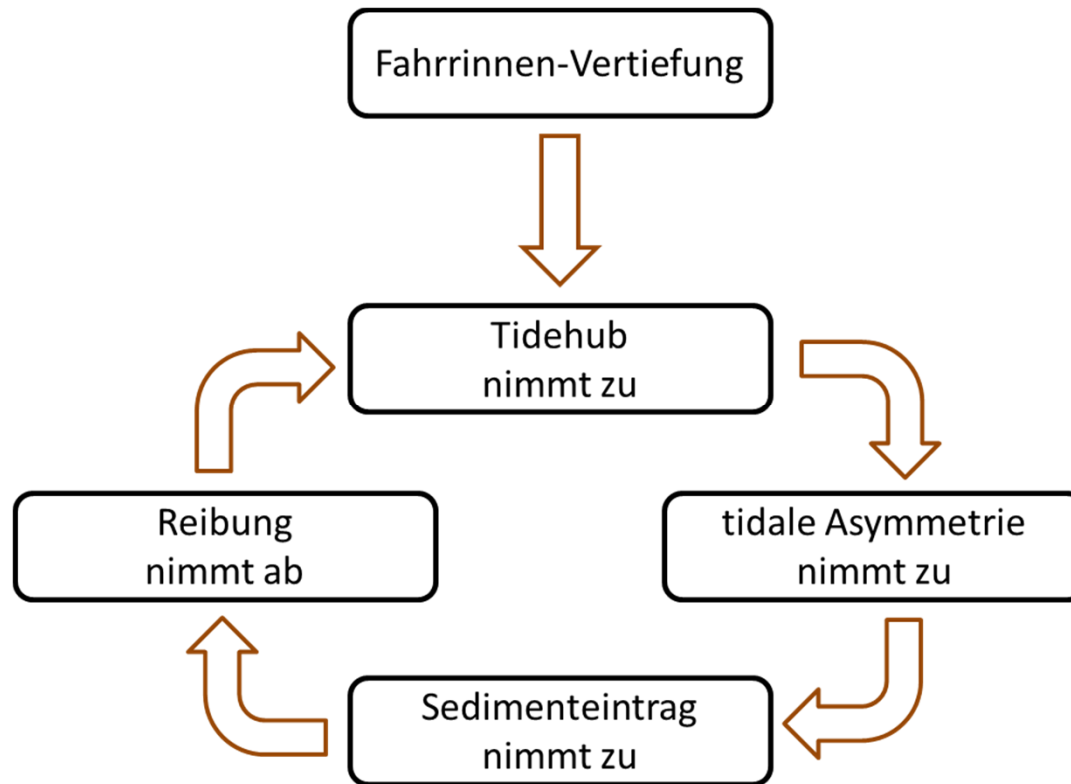
1. Problem Verschlickung Tide-Ems



2. Kernaussage

J. C. Winterwerp

"On the response of tidal rivers to deepening and narrowing"
Deltares Bericht im Rahmen des "Long-Term Vision of Scheldt estuary" - Projekts ; März 2013



Hypothese:

Dieser Teufelskreislauf kann so weit führen, dass das Ästuar in einen hyperturbidem Zustand gerät, aus dem es nicht wieder zurückkehrt.

3. Methoden

- a) **analytische Lösung der linearisierten 1D-Flachwassergleichungen** mithilfe von harmonischen Funktionen

- b) **"Proxy" für die tidale Asymetrie** aus Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten

- a) **Abschätzung Reibungsverminderung infolge Suspension** mit 1DV-Modell

- b) **Umkippen in hyperturbide Verhältnisse infolge hindered-settling** durch Abschätzung Ri_{flux}

4. Analysen und Ergebnisse

a) analytische Lösung der linearisierten 1D-Flachwassergleichungen

Massen-Bilanz

$$b \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (Au)}{\partial x} = 0$$

Impuls-Bilanz

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \text{Reib} = 0$$

Vernachlässigungen, Linearisierungen

$$A = b_c(x) * h \quad \text{Tidenhub} \ll \text{Wassertiefe}$$

$$b = b_c(x) + \Delta b$$

$$b_c(x) = b_0 * e^{(-x/L_b)}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

Vernachlässigung
Konvektion

$$\text{Reib} = \frac{ru}{h}$$

linearisierte Reibung

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left(\frac{b_c h}{b_c + \Delta b} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{u}{L_b} \right) = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{ru}{h} = 0$$

Resultat: Gleichungen linear in u und η

4. Analysen und Ergebnisse

a) analytische Lösung der linearisierten 1D-Flachwassergleichungen mithilfe von harmonischen Ansätzen (Exponentialfunktionen).

$$\eta(x,t) = h + a_0 \exp\{i(\omega t - kx)\} \quad \text{and} \quad u(x,t) = U_0 \exp\{i(\omega t - kx - \phi)\}$$

Ansatz

$$i\omega a_0 - \left(\frac{A_c}{b_c + \Delta b} ik + \frac{A_c}{b_c + \Delta b} \frac{1}{L_b} \right) U_0 \exp\{-i\phi\} = 0$$

$$igka_0 - \left(i\omega + \frac{r}{h} \right) U_0 \exp\{-i\phi\} = 0$$

eingesetzt

$$L_b k^2 - ik - \frac{b_c + \Delta b}{ghb_c} L_b \omega^2 \left(1 - i \frac{r}{\omega h} \right) = 0$$

$$U_0 = \text{mod} \left[\frac{igka_0}{(i + r_*) \omega \exp\{-i\phi\}} \right] = \frac{ga_0}{\omega} \sqrt{\frac{k_r^2 + k_i^2}{r_*^2 + 1}}$$

nach Einigem an linearer Algebra und Benutzung von MAPEL

$$k_r = \pm \frac{1}{4L_b} \left[2 \sqrt{\left(4(1 + \Delta b/b_c) \frac{L_b^2 \omega^2}{gh} - 1 \right)^2 + \left(4(1 + \Delta b/b_c) \frac{L_b^2 \omega^2}{gh} \right)^2 \left(\frac{r}{\omega h} \right)^2} + 2 \left[4(1 + \Delta b/b_c) \frac{L_b^2 \omega^2}{gh} - 1 \right] \right]^{1/2} \quad (10a)$$

$$k_i = \frac{1}{2L_b} \mp \frac{1}{4L_b} \left[2 \sqrt{\left(4(1 + \Delta b/b_c) \frac{L_b^2 \omega^2}{gh} - 1 \right)^2 + \left(4(1 + \Delta b/b_c) \frac{L_b^2 \omega^2}{gh} \right)^2 \left(\frac{r}{\omega h} \right)^2} - 2 \left[4(1 + \Delta b/b_c) \frac{L_b^2 \omega^2}{gh} - 1 \right] \right]^{1/2} \quad (10b)$$

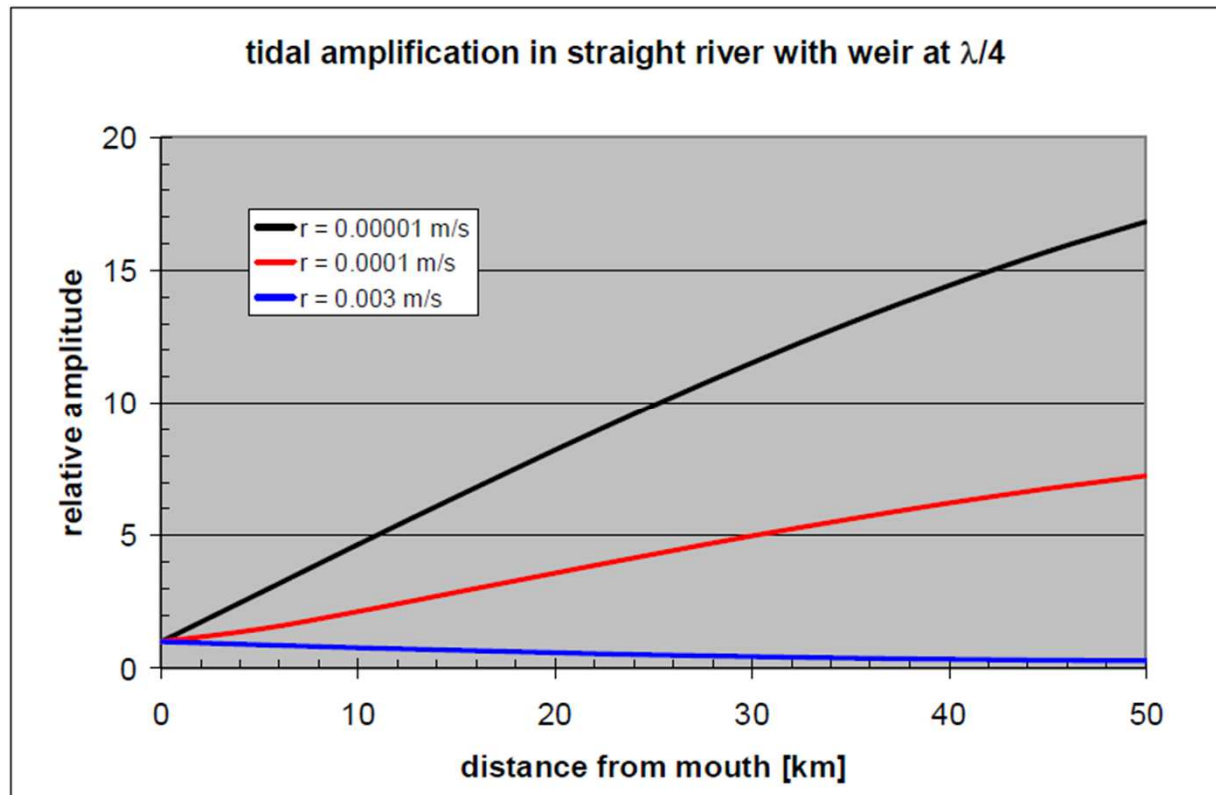
Lösung

gerade und reibungsfrei führt auf:

$$\sqrt{gh} = \frac{\omega}{k_r}$$

4. Analysen und Ergebnisse

a) analytische Lösung der linearisierten 1D-Flachwassergleichungen mithilfe von harmonischen Funktionen.



Graphik aus:

J. C. Winterwerp 2013 (s. o.)

Fig. 2.3: Evolution of tidal wave in 5 m deep, straight estuary ($\lambda = 315$ km) and weir at 79 km; $r = 0.000001$ m/s yields $C \approx 1000$ m^{1/2}/s; $r = 0.0001$ m/s yields $C \approx 300$ m^{1/2}/s and $r = 0.003$ yields $C \approx 60$ m^{1/2}/s ($L_b = \infty$).

Wenn ein Ästuar

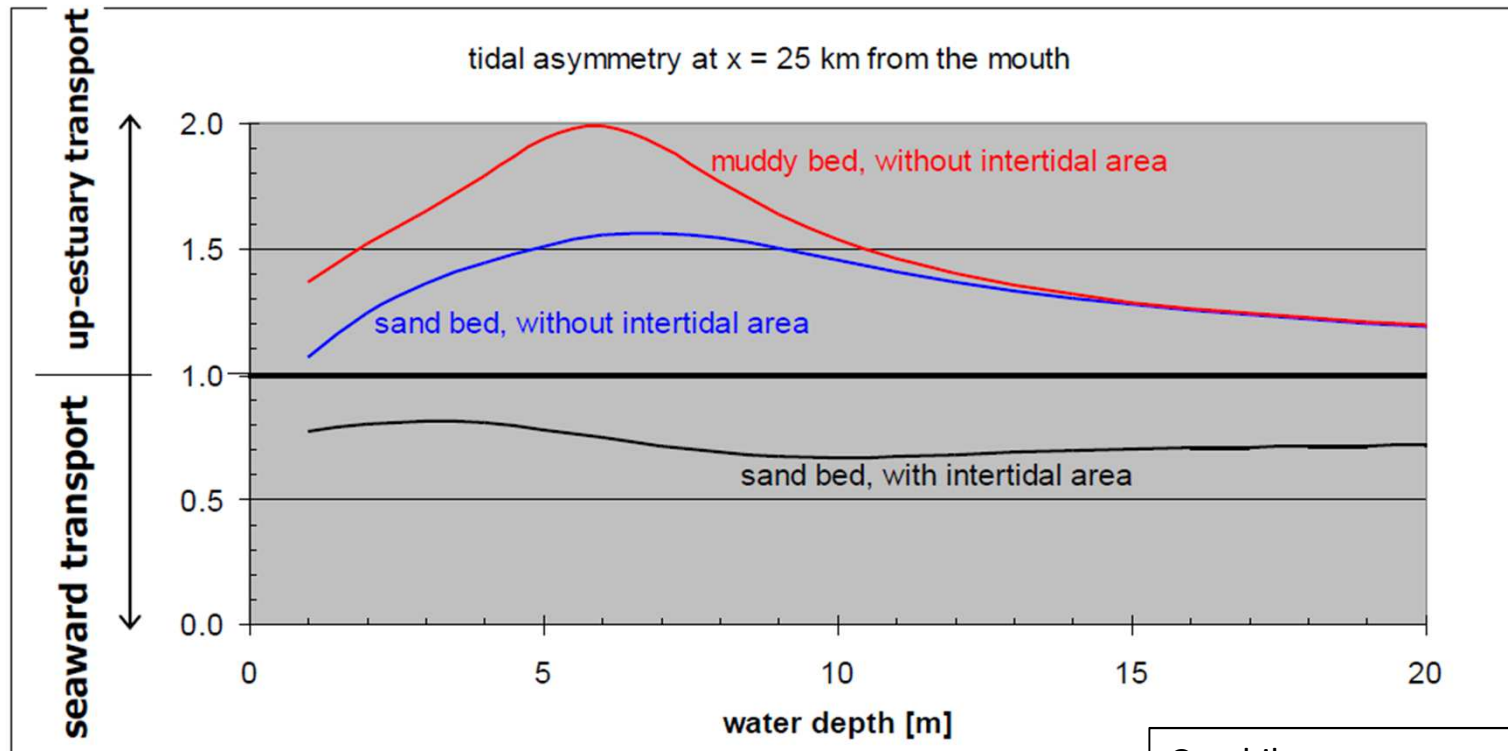
1. durch Vertiefung in die Resonanz gelegt wird und
 2. die Reibung klein wird,
- dann können an der landseitigen Ästuargrenze (Wehr) exorbitante Tidehübe auftreten.

4. Analysen und Ergebnisse

b) "Proxy" für die tidale Asymmetrie

Verhältnis der
Wellenausbreitungs-
geschwindigkeiten
Niedrigwasser/Hochwasser

$$\gamma = \frac{c_{HW}}{c_{LW}} = \frac{k_{r,LW}}{k_{r,HW}}$$



Graphik aus:
J. C. Winterwerp 2013 (s. o.)

Wenn ein Ästuar

1. die seitlichen Retentionsräume verliert und
 2. die Reibung klein wird,
- dann kann die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit bei Hochwasser viel schneller als diejenige bei Ebbe werden.

4. Analysen und Ergebnisse

c) Abschätzung Reibungsverminderung infolge Suspension

$$\frac{\bar{u}}{u_*} \equiv \frac{C_{eff}}{\sqrt{g}} = \frac{C_0}{\sqrt{g}} + \frac{C_{SPM}}{\sqrt{g}} = \frac{C_0}{\sqrt{g}} + 4 \frac{h}{h_{ref}} \mathbf{Ri}_* \beta$$

$$\mathbf{Ri}_* \equiv \frac{(\rho_b - \rho_w)gh}{\rho_b u_*^2} = \frac{\varepsilon_\rho cgh}{(\rho_w + \varepsilon_\rho c)u_*^2} \quad \text{and} \quad \beta \equiv \frac{\sigma_T W_s}{\kappa u_*}$$

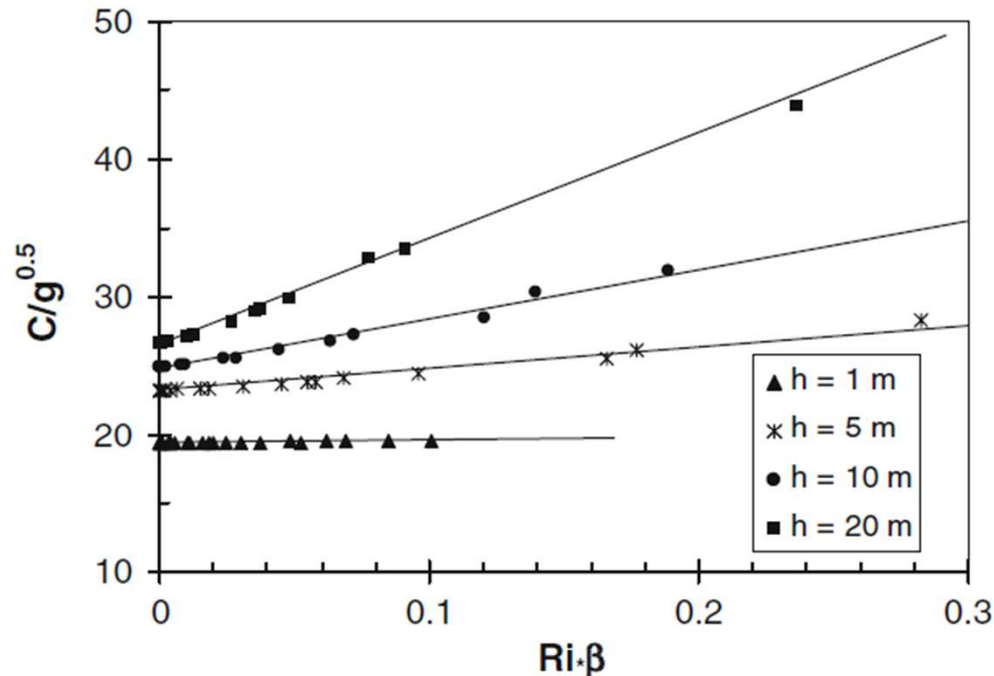


Fig. 8 Numerical experiments with 1DV POINT MODEL, determining drag reduction as a function of $Ri_*\beta$ for $\sigma_T=2$; variation of h , U , z_0 , C_0 , and W_s

Der Anstieg von

1. Konzentration und
2. Sinkgeschwindigkeit
von suspendierten Sedimenten
verursacht einen deutlichen
Rückgang der Reibungsbeiwerte.

Graphik aus:

J. C. Winterwerp et al.

Sediment-induced buoyancy destruction

and drag reduction in estuaries

Ocean Dynamics (2009) 59:781–791

DOI 10.1007/s10236-009-0237-y

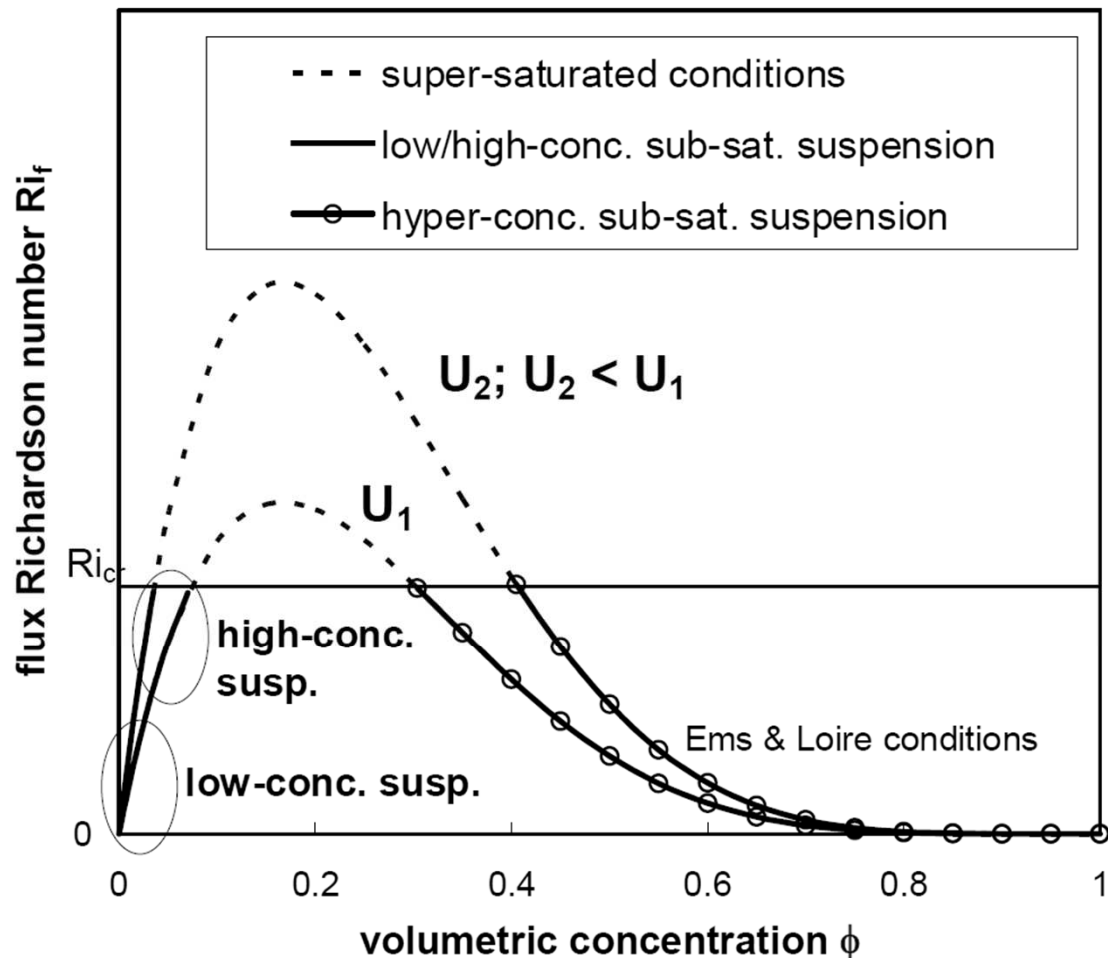
4. Analysen und Ergebnisse

d) Umkippen in hyperturbide Verhältnisse

1973]. Ri_f was further elaborated, assuming a logarithmic velocity profile and local equilibrium between settling and mixing. The effects of hindered settling, as modeled by *Richardson and Zaki* [1954] were included as well. Then, to first order Ri_f can be written as:

$$Ri_f \propto \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} \frac{ghW_s c_{gel}}{\rho u_*^3} \phi(1 - \phi)^5 \quad (1)$$

in which g is the acceleration of gravity, ρ_w is the density of water, ρ_s is the density of sediment, ρ is the bulk density of the sediment-water mixture, h is the water depth, W_s is the settling velocity of a single sediment particle in still water, u_* is the shear velocity, and ϕ is the volumetric sediment concentration, defined as $\phi = c/c_{gel}$, where c is the mass concentration of the suspended sediment and c_{gel} its gelling concentration, i.e., the concentration at which the suspension forms a space-filling network. The factor between parentheses in (1) accounts for the effects of hindered settling according to *Richardson and Zaki* [1954]. Intui-



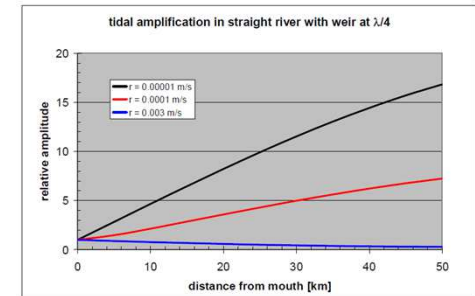
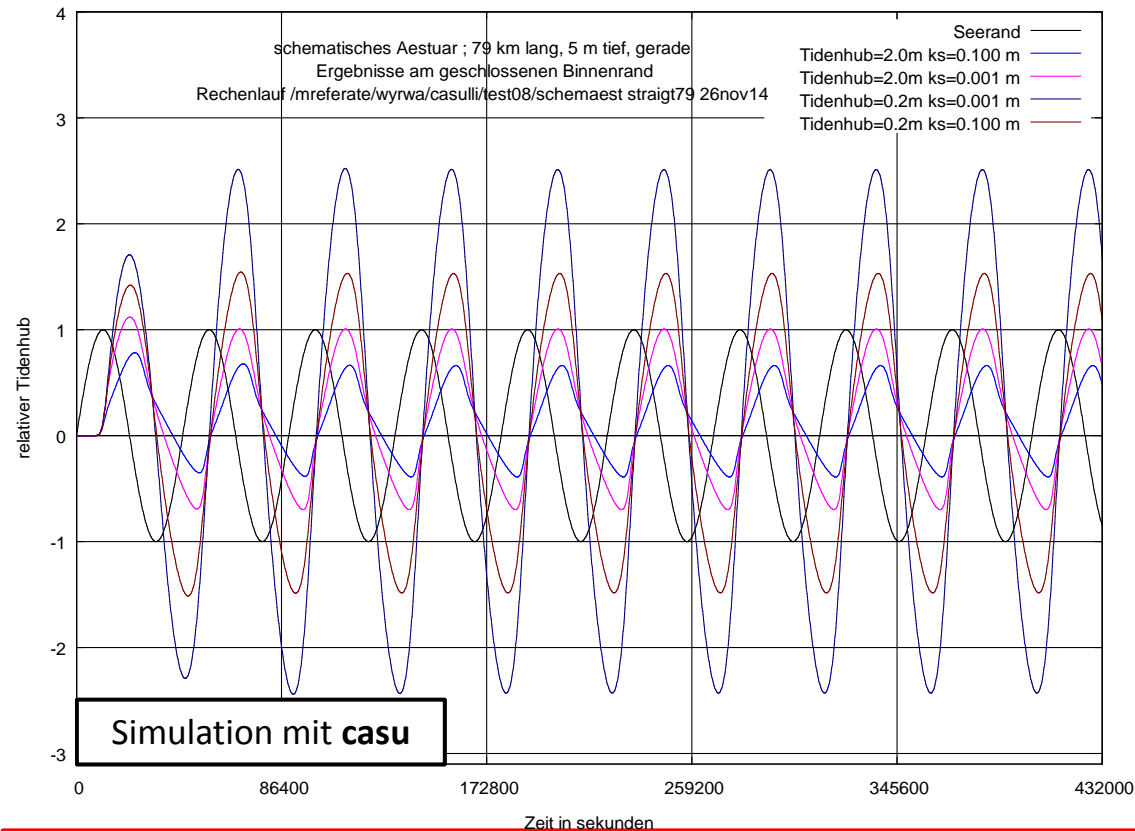
aus: J. C. Winterwerp

"Stratification effects by fine suspended sediments at low, medium, and very high concentrations",

Journal of Geophysical Research, Vol. 111, 2006,

doi:10.1029/2005JC003019

5. Kritik der Analysen a) Vergrößerung Tidenhub

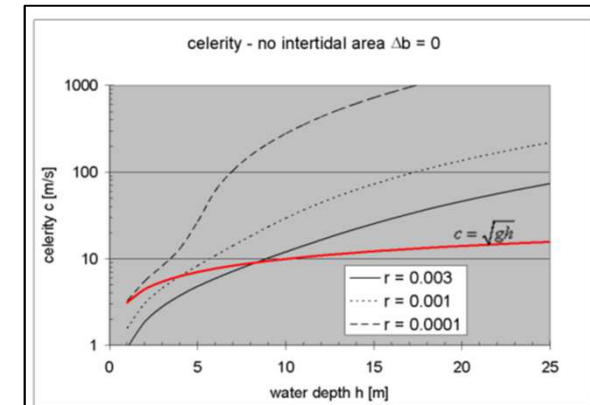
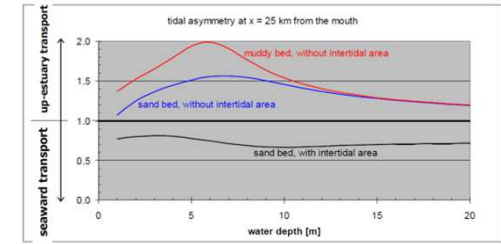
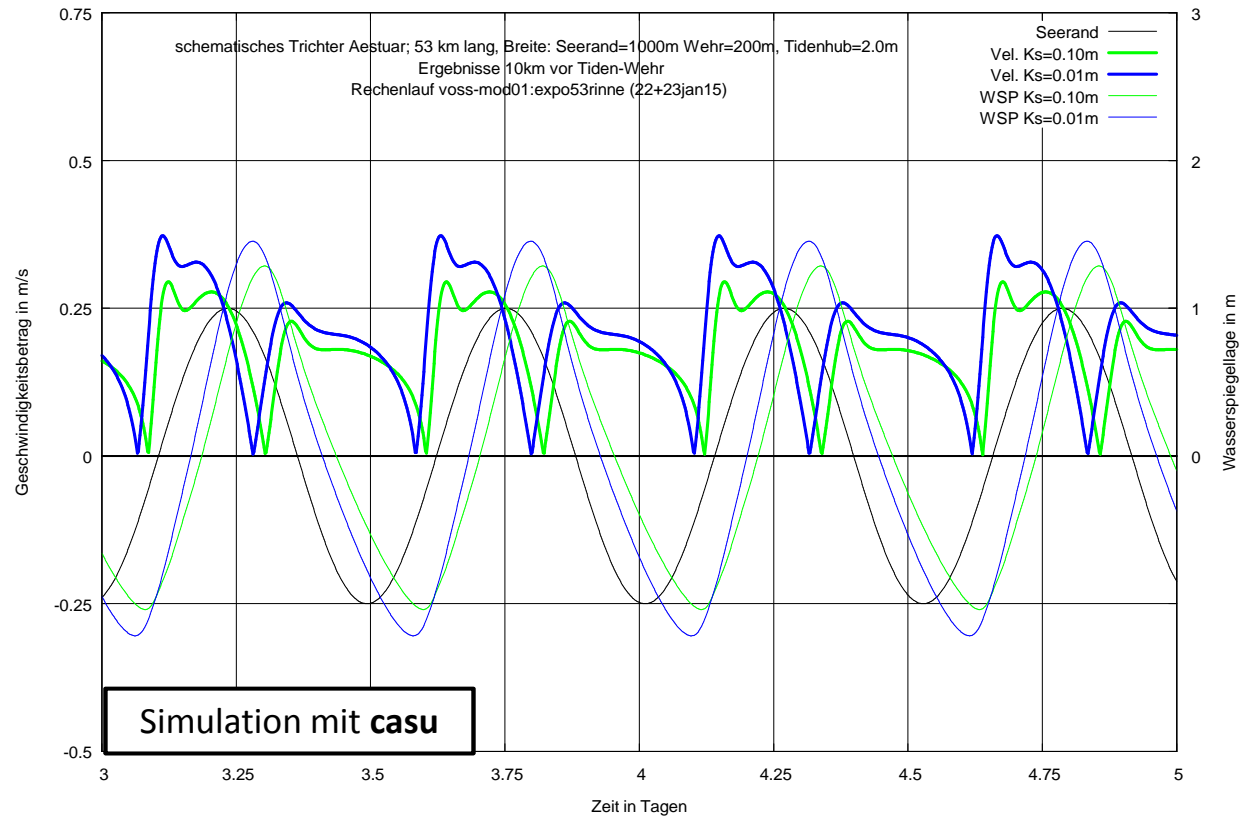


Es ist schlüssig anzunehmen, dass:

Vertiefung und Verringerung von Reibung den Tidenhub im inneren Ästuar erhöhen, auch wenn:

die Lösung der lin. Gleichungen den Effekt weit überschätzen und Resonanz keine so prominente Rolle spielt

5. Kritik der Analysen b) Verstärkung Asymetrie



Ergebnisse für Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten unplausibel
 Graphik aus:
 J. C. Winterwerp 2013

Es ist schlüssig anzunehmen, dass:
 die Verringerung der Reibung die tidale Asymetrie verändert.
 allerdings:
 Die Zusammenhänge zwischen Strömung und Sedimenttransport werden nicht explizit angegeben sondern nur intuitiv vorausgesetzt.

5. Kritik der Analysen c)Verringerung Reibung

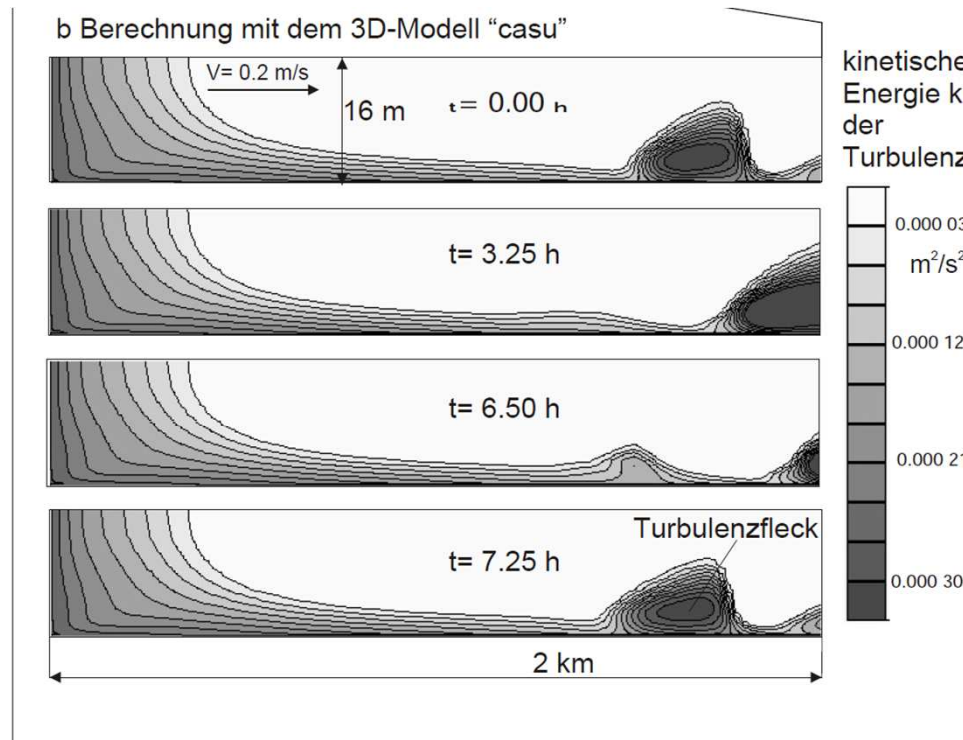
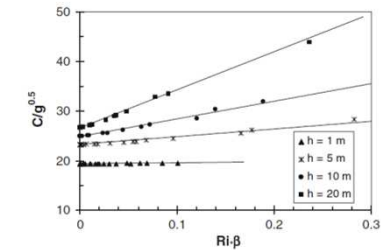


Bild 42. Testfall Deposition.
a Konzentrationen berechnet von WINTERWERP [142] mit dem 1DV-Modell,
b kinetische Energie k der Turbulenz berechnet mit dem 3D-Modell "casu".

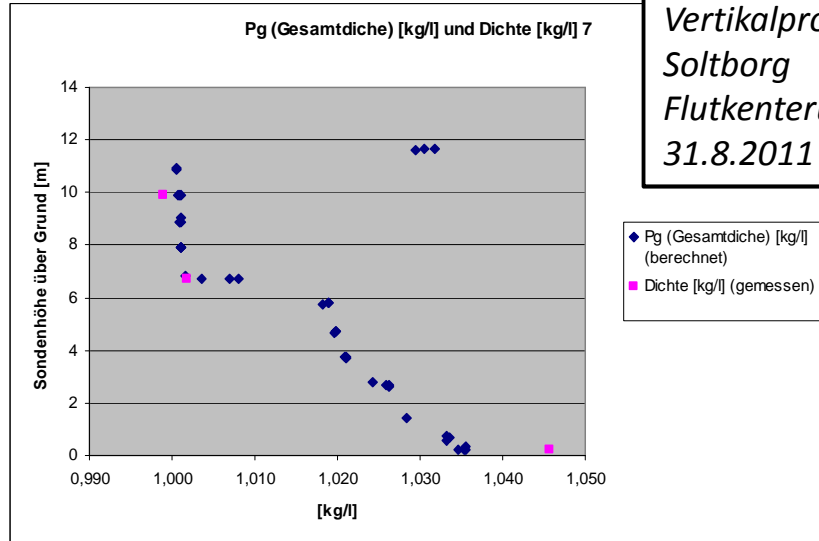


Graphik aus:
Wyrwa 2003, Diss TU-Berlin

Verweise auf experimentelle Befunde
ebenda Kap. 6.8

Es ist schlüssig anzunehmen, dass:
absinkende suspendierte Sedimente Dichtegradienten erzeugen, welche die Reibung verringern
auch wenn:
die Annahme horizontaler Gleichförmigkeit in einem realen Ästuar nicht erfüllt ist.

5. Kritik der Analysen c) Verringerung Reibung



Vertikalprofil
Soltborg
Flutkenterung
31.8.2011

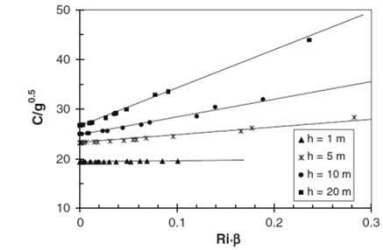


Fig. 8 Numerical experiments with 1DV POINT MODEL, determining drag reduction as a function of Ri, β for $\sigma_T=2$; variation of h, U, z_0, C_D , and W_s

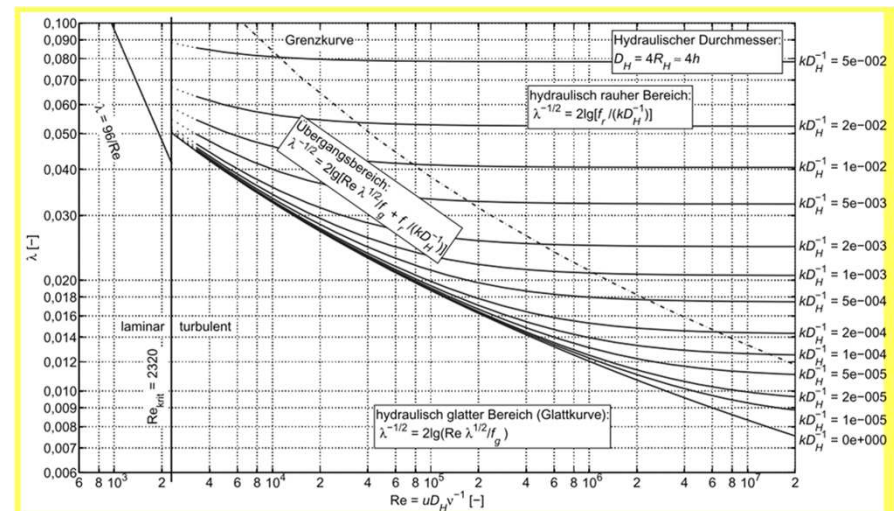
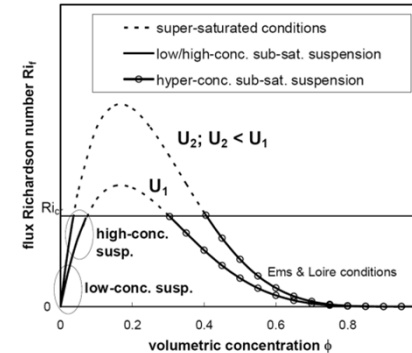


Bild 37: Moody-Diagramm zur Bestimmung des Fließwiderstands λ in offenen Gerinnen (mit hydraulischem Durchmesser D_H , hydraulischem Radius R_H , Parameter f_g und f_r zur Berücksichtigung der Querschnittsform nach BOLLRICH 2007)

Es ist schlüssig anzunehmen, dass:
 Dichtegradienten die Reibung verringern
 aber:
 Dichtegradient innerhalb einer Fluid Mud Schicht?

5. Kritik der Analysen d) Umkippen



Einwand: Fluid Mud nimmt nicht die ganze Wassertiefe ein.

Einwand: Bei Stromkenterung ist $Ri = \infty$, das müsste zu Sedimentation führen
aber: auch bei Stillstand von Fluid Mud konsolidiert dieser nicht sofort

Einwand: Eine Hochwasserwelle von Oberstrom spült die Trübungszone seewärts

Es ist schlüssig anzunehmen, dass:

hindered settling dazu führt, dass bei gleicher Sohlreibung mehr Sediment in Schwebelagehalten werden kann.

auch wenn:

der Effekt mit der gewählten Abschätzung nicht quantifiziert werden kann und die Unumkehrbarkeit des Prozesses nicht erkennbar ist.

5. Einschätzung

a) Die Gefahr des Übergangs in einen hyper-turbiden Zustand ist real

- Selbstverstärkungs-Mechanismus wird schlüssig belegt,
- weitere Selbstverstärkungs-Mechanismen (Thixotropie) möglich.
- Beispiel u. a. Tide-Ems.

aber:

- unklar bleibt, ob es sich um ein Umkippen mit einem "point of no return" handelt.
- Zeitskala des Übergangs unklar.

b) Die verwendeten Methoden erlaubt keine sichere Quantifizierung

- Annahmen in der Herleitung zu weitgehend

aber:

die Analyse kann an die Verhältnissen in einigen bekannten Ästuaren angepasst werden.

...

winterwerp2013_response_tidal_rivers_to_deepening_and_narrowing.pdf - Adobe Reader

Datei Bearbeiten Anzeige Register Hilfe

Ausfüllen und Unterschreiben Kommentar

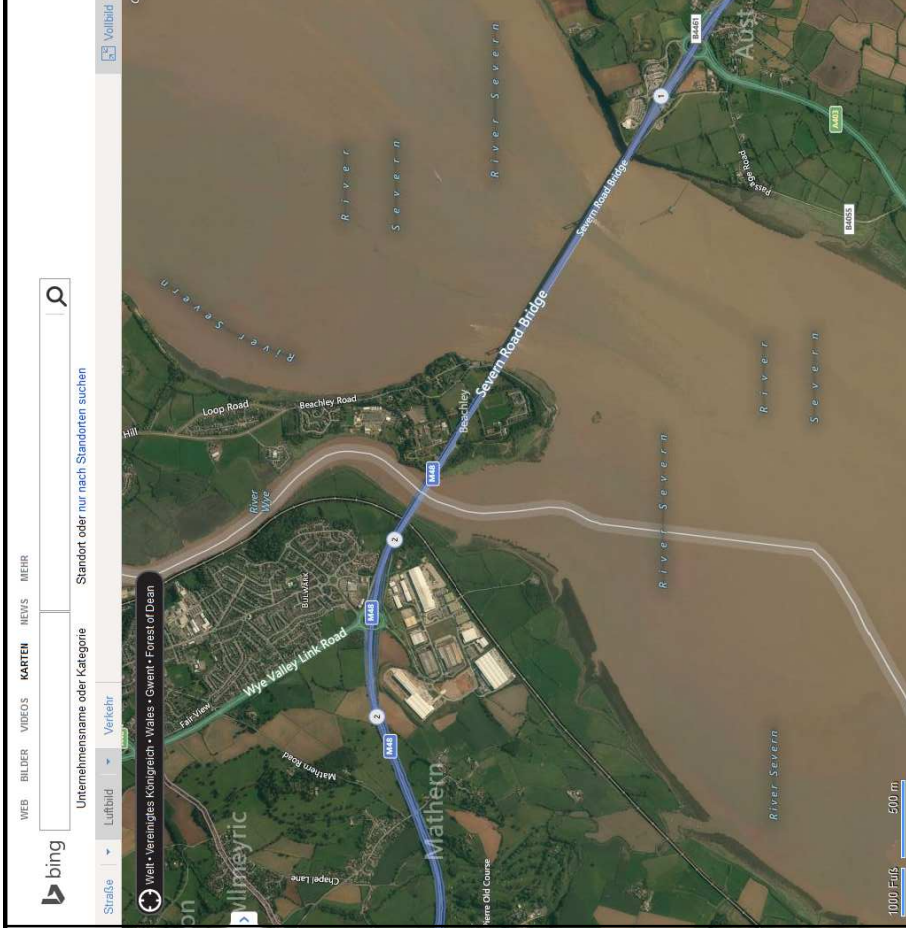
125% 79 / 86

Table 5.1: Comparison of natural, macro-tidal rivers with (very) high suspended sediment concentrations and heavily engineered estuaries. This table suggests that by engineering estuaries too much, their regime is shifted from the left column to the right column.

deepened and narrowed	natural macro-tidal rivers
Ems (Germany) +++	Amazon mouth (Brazil) +++
Elbe (Germany) ++	Alligator River (Australia) ++
Garonne (France) ++	Bay of Fundy (Canada) +++
Loire (France) +++	Bay Saint Malo (France) +++
Ouse (UK) ++	Jiaojiang River (China) ++
Seine (France) +/+++	Mersey (UK) +++
Trent (UK) ++	Severn River (UK) +++
Vilaine (France) ++	
Weser (Germany) +/+++	
Western Schelde +	
Upper Sea Scheldt ++	

+++ hyper-turbid conditions
++ "normal" estuarine conditions
+

210 x 287 mm



5. Einschätzung (... Fortsetzung)

c) Das Auftreten von hyper-turbiden Zuständen im Elbe Ästuar kann auf der Basis der Winterwerp'schen Analysen grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden

aber:

- die Anpassung von Konvergenzlänge und Reibungsbeiwert für das Elbe-Ästuar gelingen Winterwerp nicht vollständig. Er empfiehlt weitergehende Untersuchungen.

step in bed level around Hamburg, or otherwise.

However, these conclusions are based on a limited series of data, and further substantiation is possible only upon further analysis. We recommend the following:

- Make harmonic analyses of the historical tidal data at the various tidal stations along the

**Aussagen darüber,
wie weit das Elbe-Ästuar noch vom hyper-turbiden Zustand entfernt ist,
lassen sich mit Hilfe der von Winterwerp vorgelegten Analysen nicht gewinnen.**

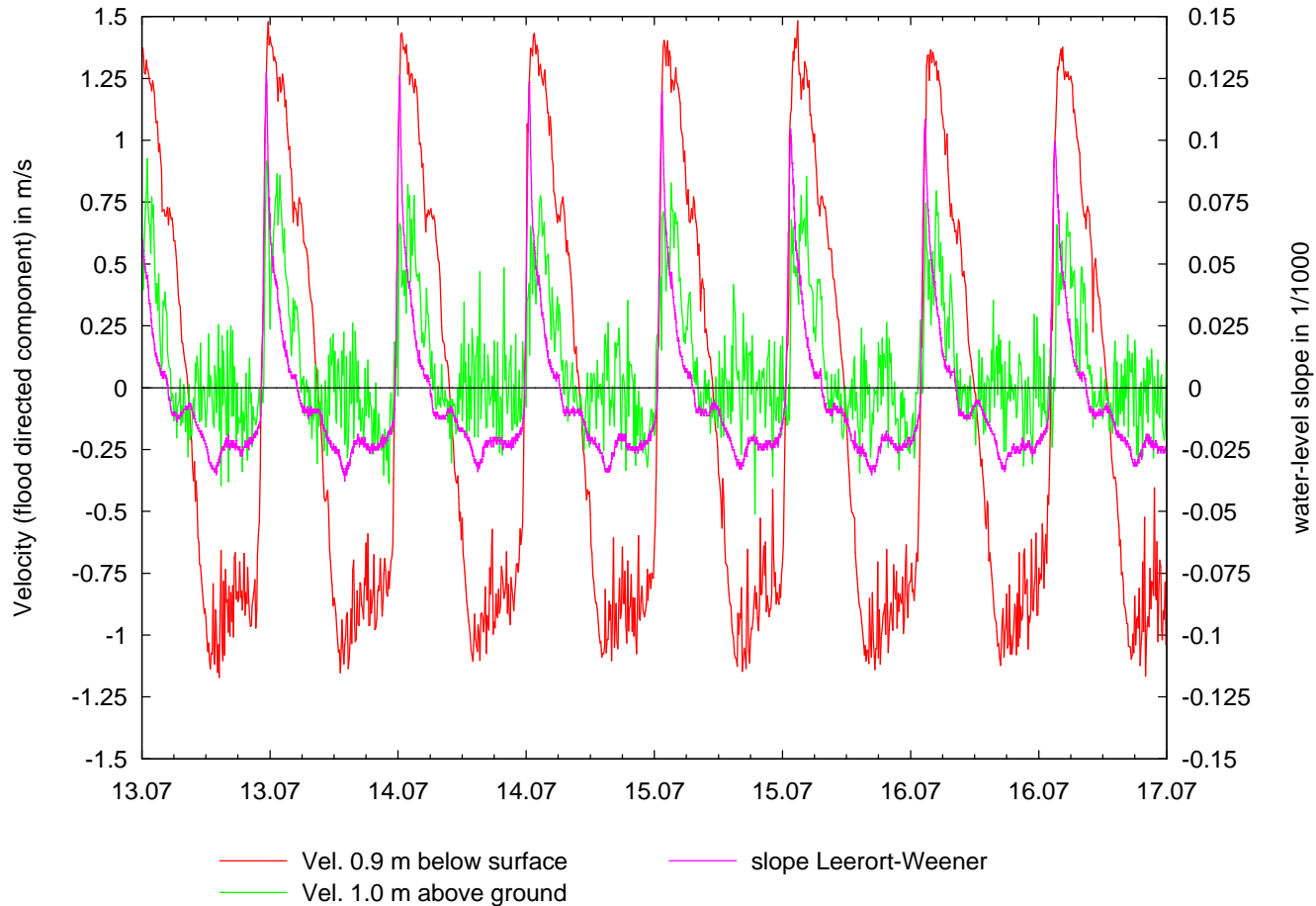
6. Maßnahmenvorschläge

- I. Messmethoden für die Bewegung von Wasserschichten mit sehr großen Suspensionsgehalten (weiter)-entwickeln**

- II. Aufbereitung Verschlickungsgeschichte hyperturbid gewordener Ästuar
Ems u. a.**

- III. Methoden zur Quantifizierung (numerische Simulierbarkeit) von Verschlickung (weiter)-entwickeln**

Tidal-Ems measuring location Soltborg 2013



7. Nachbemerkungen: Selbstverstärkung mittels Thixotropie

Die Geschwindigkeitsmessungen (soweit sie denn zutreffend sind) an der Station Soltborg deuten darauf hin, dass nur die großen Wasserspiegelgradienten der anlaufenden Flut die Fluid Mud Schicht bewegen und aufbrechen können. In der ablaufenden Ebbe bewegt sie sich nur wenig.

Dies könnte mit der Thixotropie des Materials erklärt werden.

Dies würde einen Selbstverstärkungsmechanismus begründen, nämlich, dass das Auftreten von Fluid Mud zu einer Verstärkung des stromauf gerichteten Sedimenttransports führt.

Tidengemittelte Wege in m	Flutweg	Ebbweg oben (0.9m unter WSP)	Flutweg	Ebbweg mitte (2.0m ü. Sohle)	Flutweg	Ebbweg unten (1.0m ü. Sohle)
Zeitraum						
28.05.2013 09:00 - 03.07.2013 07:45	14.856	20.369	6.262	4.011	4.630	2.104
03.07.2013 08:05 - 15.08.2013 08:00	14.700	18.957	5.363	2.843	6.145	2.354
15.08.2013 08:10 - 16.09.2013 08:50	14.186	18.773	5.344	2.786	4,531	2.360
16.09.2013 09:00 - 04.11.2013 12:20	10.928	9.038	2.754	2.403	1.504	1.369