

Teilprojekt 2:

Flockendynamik und Suspensionsverhalten unter Einfluss von Turbulenz und Salzsichtungung

Gregor Kühn, Gerhard H. Jirka

1 Einleitung

Wasserqualität in natürlichen Gewässern ist stark mit dem Auftreten von Sedimentpartikeln in der Wassersäule gekoppelt. Feine Sedimente bieten eine große spezifische Oberfläche und eine hohes Maß an Adsorptionsfähigkeit, was zur elektrostatische Anziehung von Wasserinhaltsstoffen an der Partikeloberfläche führt. Weiterhin können chemische Reaktionen, welche an der Partikeloberfläche stattfinden können, die Wasserinhaltsstoffe verändern. Um den Transport von Wasserinhaltsstoffen und im speziellen von Schadstoffen in natürlichen Gewässern zu verstehen, muss das Verhalten von Feinsedimenten in seiner natürlichen Umgebung untersucht werden. Hierbei wichtige Prozesse sind die Flockung und die Zerstörung von Flocken, was zu Partikel- und Flockengröße unterschiedlichster Größenbereiche führt.

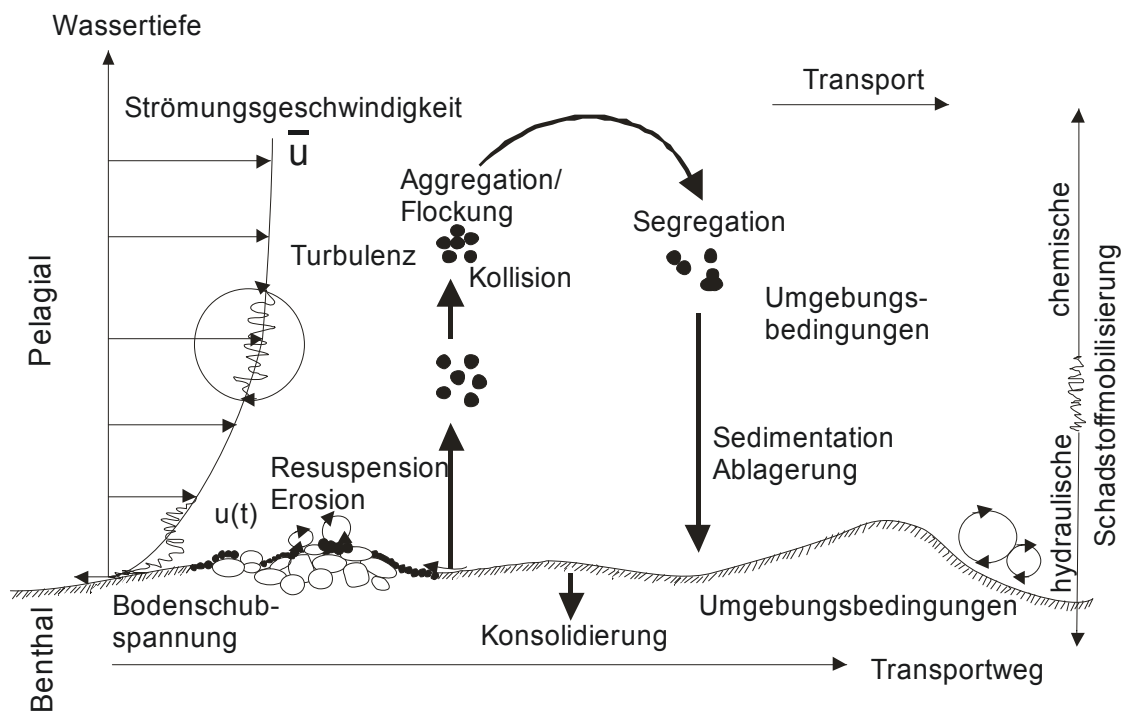


Abb. 1: Schematische Darstellung der Feinsedimentdynamik in einem Fluss

Die treibende mechanische Kraft dieses Systems ist die Strömung. Die Strömungsgeschwindigkeit, welche die Strömung beschreibt, setzt sich auf der mittleren Strömung sowie turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen zusammen. Die Geschwindigkeitsunterschiede sind für Schubkräfte und die Kollision einzelner Partikel verantwortlich (van Leussen, 1994). Daraus folgt (Brunk, 1997), dass die Veränderung der Partikelgröße stark mit den Turbulenzbedingungen in der Wassersäule einer offenen Gerinneströmung gekoppelt ist. Abb. 1 zeigt den Kreislauf von Feinsediment in der Wassersäule eines Flusses. Während das Sediment mit der Strömung transportiert wird, findet es veränderte Umgebungsbedingungen vor und verändert dabei sich selbst.

In einem neuartigen experimentellen Versuchsaufbau, welcher eine Weiterentwicklung der differentiellen Turbulenzsäule nach Brunk et al. (1996) darstellt, werden kontrollierbar Turbulenzprofile erzeugt, die natürliche Verhältnisse widerspiegeln. Hierin werden sowohl Partikelgröße als auch Konzentrationsprofile gemessen, um eine Beziehung zwischen Massenkonzentration und Scherkräften herzustellen, welche Flockung und Flockenzerfall beeinflussen.

Dieser Laborkosmos dient als Bindeglied zwischen Feldexperimenten und numerischen Modellen. Auf der einen Seite ist es somit möglich reproduzierbar eine große experimentelle Datenbasis für die Kalibrierung und Validierung der numerischen Modelle zu schaffen, während auf der anderen Seite auf kosten- und zeitintensive Feldexperimente verzichtet werden kann, welche ohnehin meist nur eine lokale Momentaufnahme darstellen. Dabei müssen selbstverständlich die maßgebenden Prozesse naturgetreu nachgebildet werden.

2 Experimente

Die grundlegende Idee des Versuchsaufbaus besteht in der Nachbildung des Turbulenzprofils einer offenen Gerinneströmung, wobei zur Turbulenzerzeugung vertikal angeordnete, oszillierende Gitter eingesetzt werden. Dies ermöglicht, dass das Verhalten von Sedimentpartikeln unter gut kontrollierbaren Turbulenzbedingungen lokal über längere Zeit beobachtet werden kann. Advektion in eine Hauptströmungsrichtung, wie sie durch die mittlere Strömung in einem Fluss entsteht, findet hierbei nicht statt. Somit tritt die Problematik, dass Partikel in einer Gerinneströmung sich mit stationärer Messtechnik nicht erfassen lassen, nicht auf. Basierend auf den Ergebnissen von Brunk et al. (1996) wurde eine differentielle Turbulenzsäule (Abb. 3) konstruiert, in welcher Turbulenzprofile, die natürliche Verhältnisse widerspiegeln, nachgebildet werden können. Als Grundlage hierfür dient die

Verteilung der Turbulenzintensität einer offenen Gerinneströmung nach Nezu & Nakagawa (1993).

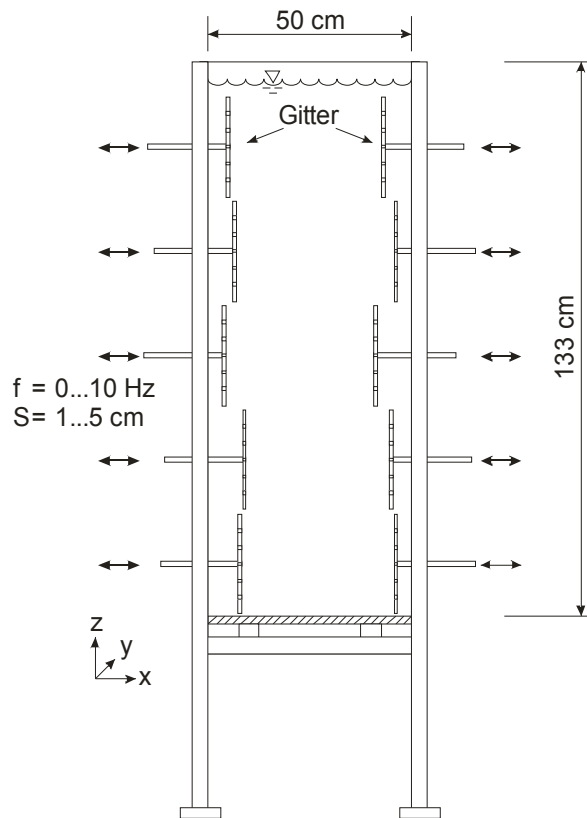


Abb. 2: Seitenansicht der differentiellen Turbulenzsäule mit jeweils 5 oszillierenden Gittern auf jeder Seite

Durch die Verwendung von oszillierenden Gitterpaaren im Gegensatz zu Einzelgittern soll ein größerer Bereich homogener Turbulenz erzeugt werden. Weiterhin wird bei Scridic et al. (1996) eine ungewöhnliche Verstärkung der Turbulenzintensität im Fall von Gitterpaaren beschrieben, was einen weiteren Vorteil darstellt.

In dem konstruierten Versuchsaufbau sind 5 Gitterpaare vertikal in einem durchsichtigen Tank übereinander angeordnet (Abb. 2). Der Tank besitzt eine Grundfläche von 50 cm x 35 cm mit einer Höhe von 133 cm. Jedes einzelne Gitter lässt sich individuell, PC-gesteuert betreiben, wobei unterschiedliche Hübe und Frequenzen möglich sind. Diese Flexibilität wird benötigt um das Turbulenzprofil nach Nezu & Nakagawa (1993) nachbilden zu können.

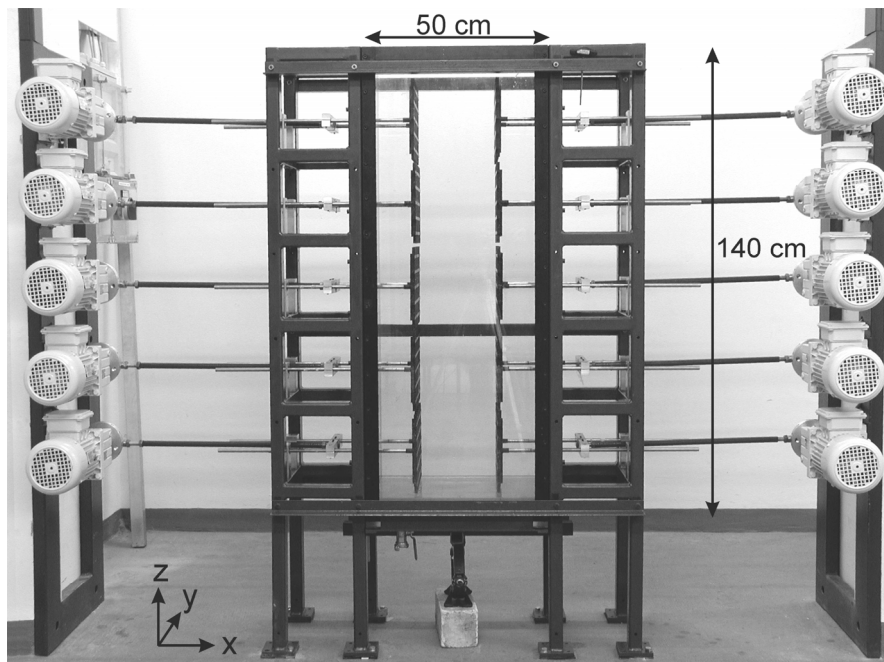


Abb. 3: Foto der differentiellen Turbulenzsäule mit Gitter im Ruhezustand

Um die Strömung in dem Tank bestimmen zu können, wurden unterschiedliche Messmethoden angewendet. Zum einen wurden Untersuchungen mit einem 2-D Laser-Doppler-Velocimeter (LDV) durchgeführt, um die Turbulenzintensitäten und mittleren Geschwindigkeiten in vertikalen Profilen zu bestimmen. Hierzu wurde die Sonde an eine automatische, vertikal verfahrenende Traverse montiert.

Zum anderen wurden Particle-Image-Velocimetrie (PIV) Messungen eingesetzt um das gesamte Strömungsfeld in der mittleren Tankregion aufzulösen. Das verwendete PIV-System (LaVision) besteht aus einem 20 mJ Nd:Yag Laser und einer Doppelbild CCD-Kamera sowie entsprechender Aufnahme- und Auswerteeinheit.

Für die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in der Wassersäule wird ein optisches Messverfahren eingesetzt. Das verwendete In-Line Mikroskop (Aello 7000) ermöglicht das Vermessen des Partikelensembles in-situ. Das Gerät besteht aus einem 38 mm starken Edelstahlstab, in dem sich ein 8 mm breiter Spalt befindet (Abb. 4). Zu beiden Seiten des Spaltes befinden sich Saphir-Scheiben. Auf der Frontseite befindet sich eine steuerbare Beleuchtungseinheit mittels LEDs. Hinter der anderen Scheibe ist ein Mikroskop-Objektiv sowie eine Firewire-Kamera untergebracht. Die aufgenommen digitalen Bilder werden mittels einer 2-stufigen Partikeldetektion ausgewertet. Dabei werden Gradientenfilter eingesetzt, um scharfe Kanten und gleichfarbige Flächen zu erkennen. Als Partikel in der Fokusebene werden gleichfarbige Flächen mit ausreichend scharfen Kanten deklariert. Es werden nur Partikel in der Fokusebene zur weiteren Auswertung herangezogen. Anhand einer Vielzahl von detektierten Partikeln und derer Größe wird statistisch die Größenverteilung ermittelt.

Dabei ist es aufgrund der optischen Auflösung möglich Partikel im Bereich von 4 bis 500 μm zu detektieren.

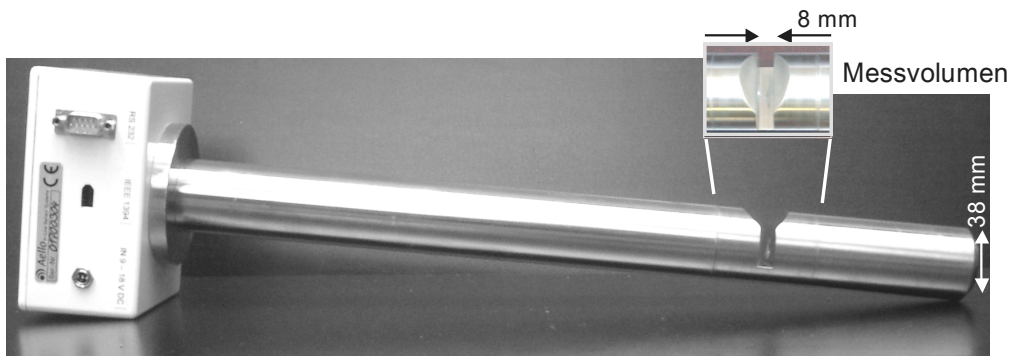


Abb. 4: Aello 7000 In-Line Mikroskop

Anhand von Prozessanschlüssen lässt sich das Mikroskop bei laufendem Betrieb der differentiellen Turbulenzsäule einbringen. Hierzu stehen 7 Prozessanschlüsse in verschiedenen Höhen zur Verfügung.

Innerhalb des Projektverbundes wurden die Geräte zur Partikelbestimmung anhand von Vergleichsproben miteinander abglichen, um für Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu sorgen. Die Gegenüberstellung des Vergleiches ist im Bericht des Teilprojekts 13 zu finden.

Die Messung der Partikelgröße wird durch die kontinuierliche Messung des Trübungsprofils in der Wassersäule ergänzt. Hierfür wird ein einziger Trübungssensor (Honeywell APMS-10GRCF-KIT) verwendet. Dieser ist an eine automatische Probenahme in 7 verschiedenen Höhen der Wassersäule gekoppelt. Damit wird an jeder der 7 Positionen der Trübungswert nacheinander bestimmt, wobei der Sensor zwischendurch jeweils mit Klarwasser gespült wird. Anschließend wird der Trübungswert eines Referenzfluids bestimmt. Dieser Zyklus wird kontinuierlich für die gesamte Dauer eines Experimentes wiederholt.

Mittels Kalibrierung der individuellen Trübungswerte für verschiedene Sedimentmaterialien lässt sich aus dem Trübungsprofil eine Massenverteilung in der Wassersäule ermitteln.

Im Rahmen des Versuchsprogramms werden verschiedene Parameter variiert, um deren Einfluss herausarbeiten zu können. Es werden die Turbulenzbedingungen, das Feinsedimentmaterial sowie deren Ausgangskonzentration verändert. Weiterhin wird in einigen Fällen zusätzlich Agarose hinzu gegeben. Agarose ist ein Polysaccharid und ein starker Gelbildner. Durch die Zugabe soll die Klebrigkeit von biologischen Inhaltsstoffen in Feinsedimenten simuliert werden (Strathmann et al., 2001).

Das durchgeführte Versuchsprogramm ist in Tab.1 dargestellt. Im Weiteren wird insbesondere auf den Referenzfall mit Kaolin H III GF mit einer Ausgangskonzentration von 500 mg/l eingegangen.

Turbulenzbedingung $f_{\max} =$	0 Hz	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz	6 Hz
Kaolin H III GF						
$c_0 = 100$ mg/l			X	X		
$c_0 = 250$ mg/l		X	XX			
$c_0 = 500$ mg/l	X	XXX	XX	XX	XX	X
$c_0 = 1000$ mg/l			X		X	
Kaolin H III GF + Zugabe von Agraose						
$c_0 = 250$ mg/l + $c_{AG} = 2000$ µg/g			X			
$c_0 = 500$ mg/l + $c_{AG} = 1000$ µg/g			X			
Quarz						
$c_0 = 500$ mg/l			X			
natürliches Sediment aus der Elbe						
$c_0 = 250$ mg/l		X	X		X	

Tab. 1: Übersicht über das durchgeführte Versuchsprogramm

3 Ergebnisse

3.1 Turbulente Strömungsverhältnisse

Eine Grundvoraussetzung für Untersuchungen bezüglich der Flockengrößenverteilung ist eine gut bekannte und kontrollierbare Turbulenzverteilung in der Turbulenzsäule. Zuerst war es notwendig die vorhandene Turbulenzverteilung in dem Tank zu bestimmen und so zu optimieren, dass diese dem Turbulenzprofil einer offenen Gerinneströmung entspricht. Für diese Messungen wurde das LDV-System in Tankmitte eingesetzt. Die Anregungsbedingungen für die oszillierenden Gitter wurden nach Brunk et al. (1996) gewählt. Dabei nimmt die Frequenz der Gitter nach oben hin in Abhängigkeit von der Frequenz des bodennahen Gitters ab (82%, 67%, 55%, 45% von $F_{\text{Bodengitter}}$). Die Frequenzen der bodennahen Gitter variierten dabei zwischen 1 Hz und 6 Hz. Der Hub wurde im Bereich von 2 bis 5 cm eingestellt. Letztendlich wurde dieser allerdings bei 3 cm fixiert, um mit einer Einstellung einen großen Bereich von nutzbaren Turbulenzprofilen abzudecken.

Die Intensität der Turbulenz lässt sich als turbulente kinetische Energie $k^{1/2}$ wiedergeben, welche wie folgt definiert ist

$$k = TKE = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (1)$$

wobei u' , v' und w' die Geschwindigkeitsfluktuationen in x-, y- und z-Richtung sind. Mit der Annahme von Isotropie lässt sich die turbulente kinetische Energie auch ausdrücken als

$$\sqrt{k} = \sqrt{\frac{3}{4}(u'^2 + w'^2)} \quad (2)$$

Die Messungen mit dem LDV-System wurden durchgeführt, um die Verteilung der Turbulenzfluktuationen hoch aufgelöst zu bestimmen. Das Ergebnis für verschiedene Anregungsbedingungen mit einer Frequenz des Bodengitters von 1 Hz bis 5 Hz ist in Abb. 5 dargestellt. Die turbulenten Geschwindigkeitsfluktuationen sind dabei mit einer korrespondierenden Sohlschubspannungsgeschwindigkeit u_* skaliert. Zum Vergleich ist zusätzlich der Verlauf des Profils von turbulenten Geschwindigkeitsfluktuationen in einer offenen Gerinneströmung nach Nezu & Nakagawa (1993) dargestellt. Im Detail lässt sich der Effekt der oszillierenden Gitter in der Verteilung erkennen. Bedingt durch unterschiedliche Frequenzen der einzelnen Gitter und der daraus resultierenden unterschiedlichen Bewegungsrichtung kann in dem Spalt zwischen zwei Gitterpaaren ein deutlicher Anstieg der turbulenten Geschwindigkeitsfluktuationen beobachtet werden. Dieser Anstieg führt zu Verteilungsspitzen. Im Zentrum der Gitter hingegen sind die turbulenten Geschwindigkeitsfluktuationen schwächer aufgrund der geringeren Randeffekte. Trotzdem ist deutlich zu erkennen, dass in der differentiellen Turbulenzsäule im Mittel die turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen dem Verlauf in einem natürlichen Fließgewässer entsprechen.

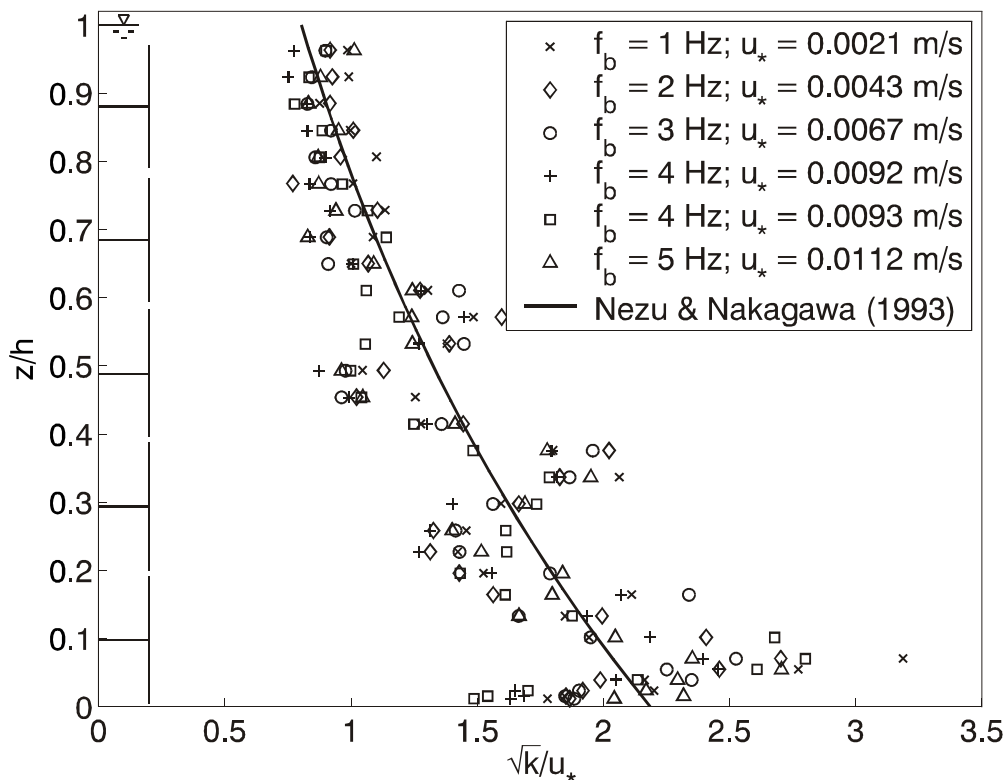


Abb. 5: Profil der turbulenten kinetischen Energie im Zentrum der differentiellen Turbulenzsäule für verschiedene turbulente Regime gemessen mit LDV.

Des Weiteren wurden PIV-Messungen an 14 verschiedenen Positionen durchgeführt. Die Frequenz des Gitters am Boden wurde dabei auf 4 Hz eingestellt, alle anderen Gitter entsprechend der Vorgabe nach Brunk et al. (1996) mit verminderter Frequenz. Die mittlere Strömung zeigt klar Sekundärströmung in Form von Zellen, welche mit der Größe der Gitter korrespondieren (Abb. 6 a). Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ist kleiner als 5 cm/s. Diese Strömung wird durch Erzeugung von Turbulenz mittels oszillierenden Gittern und der Geometrie hervorgerufen.

In Abb. 6 b ist die Verteilung von $k^{1/2}$ in der Mitte des Tanks dargestellt. Die turbulente kinetische Energie nimmt zur Wasseroberfläche hin ab. In lateraler Ausdehnungen bleiben sie jedoch im Zentrum der Turbulenzsäule konstant. Dicht am Boden werden die turbulenten Fluktuationen komplett gedämpft. Die turbulenten Fluktuationen, welche durch die RMS-Geschwindigkeit ausgedrückt werden, sind etwa genauso groß wie die mittlere Strömung.

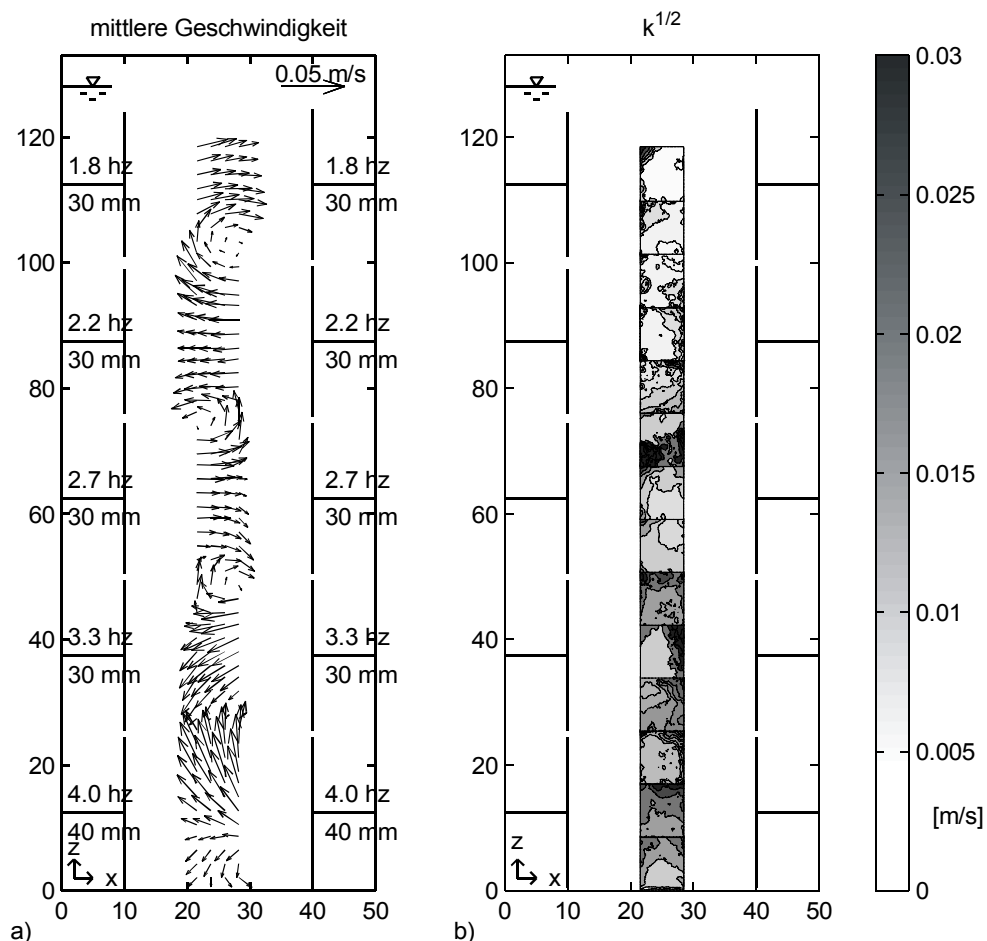


Abb. 6: (a) Mittlere Geschwindigkeiten und (b) turbulente kinetische Energie im Zentrum der differentiellen Turbulenzsäule gemessen mit PIV.

3.2 Partikelgrößenverteilung und deren Entwicklung

Im zweiten Abschnitt des Projektes wurde das Verhalten von Feinsediment in turbulenter Umgebung untersucht. Als Modellsediment wurde Kaolin gewählt. Kaolin ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ist der wichtigste Primärton und ist Aluminiumsilikathydrat mit einem eindeutig bestimmbar Kristallgitter von tellerartiger, hexagonaler Struktur. Kaolin ist ein feiner, eisenfreier, weißer Ton, der noch unzersetzte Feldspatteilchen enthält sowie Kaolinit, das Verwitterungsprodukt des Feldspat. Es zählt mit den größten Fraktionen in natürlichem Feinsediment. Das in den Versuchen verwendete Kaolinmehl H III GF (Dorfner GmbH & Co.) weist laut Herstellerdatenblatt einen mittleren Korndurchmesser d_{50} von ca. $3 \mu\text{m}$ auf. Durch die Wahl sollte die komplexe Mischung unterschiedlicher Materialien in natürlichen Sedimenten vereinfacht werden. Die untersuchte Sedimentkonzentration reichte von 100mg/l bis 1000mg/l bei unterschiedlicher turbulenter Umgebung. Zu Beginn jedes einzelnen Experiment wurde das Sediment mit dem Wasserkörper durchmischt. Während eines Experimentes wurde die Partikelgrößenverteilung jeweils in einer konstanten Lage mit dem Aello Mikroskop gemessen bis sich eine stationäre Größenverteilung eingestellt hatte. Anschließend wurde das Mikroskop dazu verwendet die Partikelgröße in sieben verschiedenen Höhen zu bestimmen. Gleichzeitig wurde an diesen sieben Position während gesamten Experimentes die Trübung und somit die Massenverteilung aufgezeichnet.

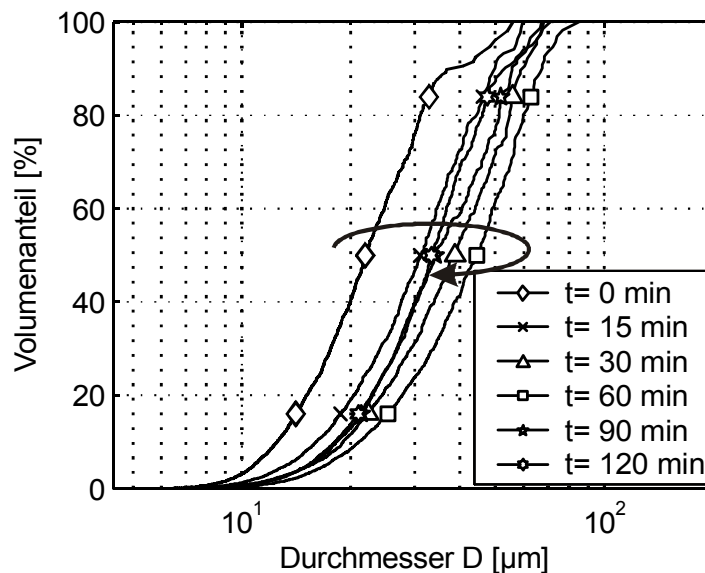


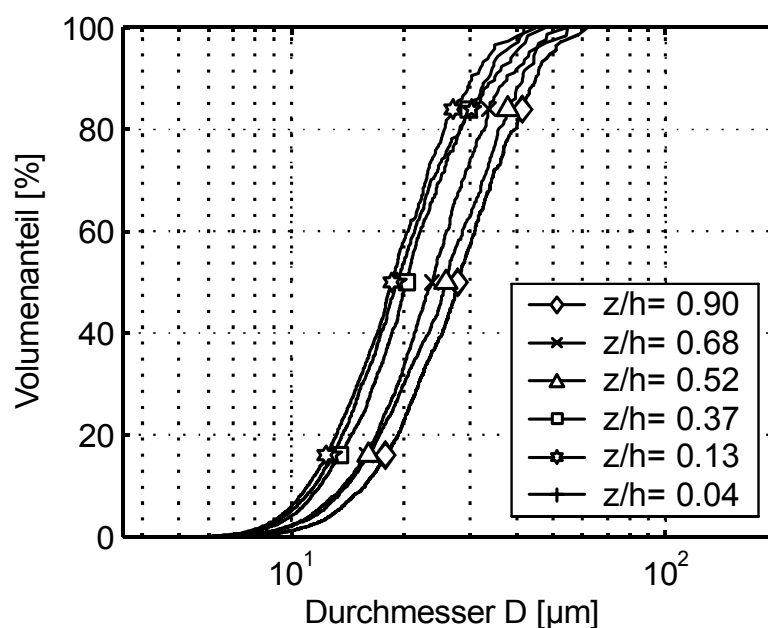
Abb. 7: Zeitliche Entwicklung der Partikelgröße von Kaolin mit einer Ausgangskonzentration von 500mg/l bei $z/h = 0.68$ mit einer Frequenz des bodennahen Gitters von 1Hz .

Die zeitliche Entwicklung der Partikelgrößenverteilung ist in Abb. 7 als Volumenverteilung beginnend mit dem voll durchmischten Zustand dargestellt. Die Anfangskonzentration betrug 500mg/l Kaolin konstant in der ganzen Wassersäule. Die Frequenz des Bodengitters wurde

auf 1 Hz eingestellt. Das Messvolumen des Mikroskops wurde in der Mitte des Wasserkörpers bei einer Höhe von $z/h = 0.68$ positioniert.

In der ersten Zeit des Experimentes von $t = 0$ min bis $t = 60$ min konnte eine deutliche Zunahme der Partikelgröße beobachtet werden. Mit dem Erreichen der maximalen Partikelgröße bei $t = 60$ min beginnt wieder eine Abnahme der Partikelgröße bis letztendlich ein stationärer Zustand nach etwa $t = 90$ min erreicht wird. Dieses Phänomen kann mit der Massenverteilung in der Wassersäule erklärt werden. Beginnend mit voll durchmischem Zustand werden etwa 90 min bei den gegebenen Turbulenzbedingungen benötigt, damit sich eine stabile Massenverteilung einstellt, wie die Trübungsmessung später zeigen. Durch die unterschiedlichen Mengen an vorhandenem Material wird die Aggregation gefördert oder unterdrückt.

Die Partikelgröße nach 90 min verbleibt jedoch größer als zu Beginn des Experimentes. Damit wird deutlich, dass bei den gegebenen Turbulenzbedingungen eine Flockung der Partikel stattfindet.



werden. Oberhalb dieser Stelle ist die Verfügbarkeit von Kaolin zu gering, um größere Flocken zu bilden. Es treffen dadurch zu selten Partikel aufeinander und haften aneinander. Unterhalb dieses Bereiches verhindern die stärkeren Scherkräfte das Anwachsen der Flocken. Ebenso wurde der Einfluss erhöhter Turbulenz untersucht, in dem die Partikelgrößenverteilung bei verdoppelter Turbulenzintensität untersucht wurde (Abb. 9). Hierbei war der Ausgangszustand der Gleichgewichtszustand des bisher beschriebenen Experimentes (Abb. 8). Die Partikelgrößenverteilung wurde wie zuvor bei $z/h = 0.68$ im Zentrum des Wasserkörpers bestimmt. Dabei wurde in Zeitabständen von 5 min die aktuelle Partikelgrößenverteilung bestimmt, welche als Volumenverteilung in Abb. 9 dargestellt ist. Zum Zeitpunkt $t = 0$ min zeigt die Partikelgrößenverteilung die größten Werte aufgrund der Aggregation, welche zuvor bei dem Zustand mit geringerer Turbulenz stattgefunden hatte. Nach $t = 5$ min mit verdoppelter Turbulenzintensität sind bereits fast alle Aggregate wieder zerstört und ein stationärer Zustand mit kleineren Partikelgrößen erreicht, welche ungefähr der Größe der Ausgangsverteilung entsprechen.

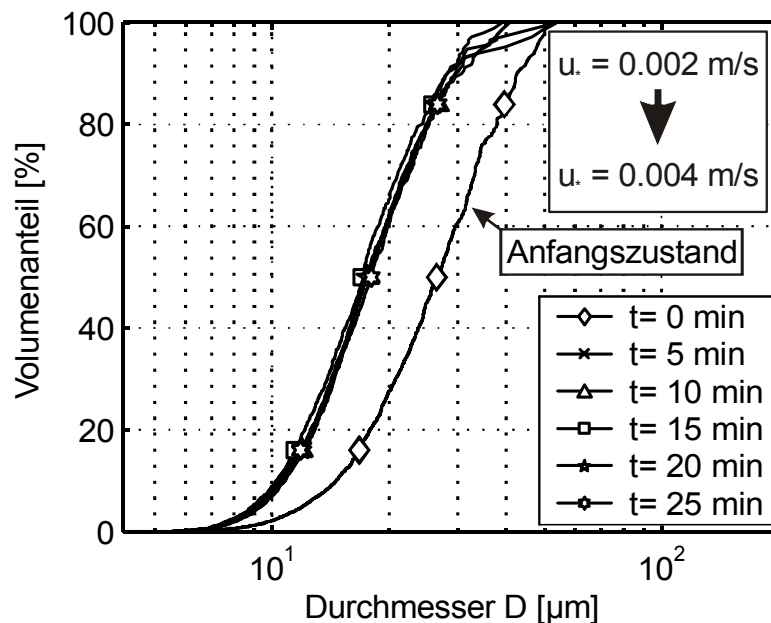


Abb. 9: Segregation von Kaolin-Flocken mit einer Ausgangskonzentration von 500 mg/l bei $z/h = 0.68$ durch Verdoppelung der Turbulenzintensität.

Zusätzlich zu der Bestimmung der Partikelgrößenverteilung wurde an den gleichen Positionen kontinuierlich die Trübung bestimmt. Über eine individuelle Kalibrierung lässt sich somit die Entwicklung der Massenverteilung in der Wassersäule bestimmen. Kaolin wurde als Modell-Sediment mit Ausgangskonzentration von 500 mg/l gleichmäßig in den Wasserkörper eingemischt (Abb. 10). Beginnend mit voll durchmischem Zustand beginnt die Trübung und damit die Masse nach 20 min am höchsten Messpunkt abzunehmen. Hierauf folgt eine

Abnahme der Trübung an den tiefergelegenen Messpunkten. In Abb. 10 a ist die Massenverteilung für reines Absinken des Partikel dargestellt. Das heißt für dieses Experiment, dass die Gitter nach vollständiger Durchmischung abgeschaltet wurden und keine Turbulenzerzeugung mehr stattfand. Die hier gezeigten Verläufe basieren rein auf dem Absetzvorgang für das Kaolin. Im nächsten Fall wurde die Frequenz des Bodengitters auf 1 Hz eingestellt (Abb. 10 b). Die Gitter oberhalb liefen entsprechend langsamer, um die Turbulenzverteilung für eine offene Gerinneströmung zu simulieren. Es ist in der kompletten Wassersäule schwaches Sedimentieren von suspendiertem Material zu erkennen. Das sedimentierte Material findet sich nach dem Versuch in den Eckenbereichen des Versuchstandes wieder. Weiterhin wird an den obersten zwei Positionen von Beginn an eine Abnahme von Masse beobachtet. Damit sich eine mehr oder weniger stabile Massenverteilung in dem Tank einstellt wird eine Zeit von $t = 90$ min benötigt. Dies entspricht somit der Zeit, welche für die Ausbildung eines stationären Zustandes in der Partikelgrößenverteilung notwendig ist. Der untere Bereich des Wasserkörpers bleibt bei den gegebenen Turbulenzverhältnissen weiterhin voll durchmischt.

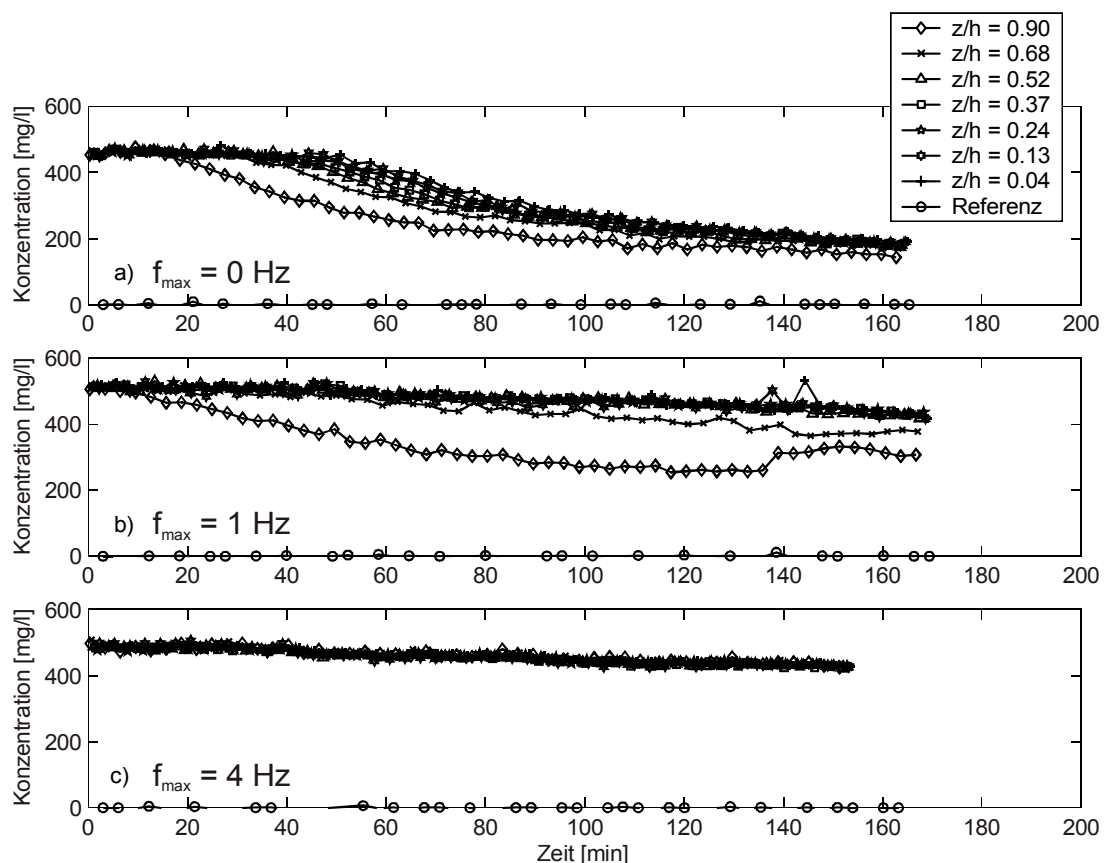


Abb. 10: Entwicklung der Massenkonzentrationsverteilung bei unterschiedlichen Turbulenzbedingungen, (a) keine Anregung, reines Absetzen, (b) niedrige Turbulenzintensität mit einer Frequenz von 1 Hz des bodennahen Gitters, (c) stärkere Turbulenzintensität mit einer Frequenz von 4 Hz des bodennahen Gitters.

Im letzten Fall wurde die Turbulenzintensität deutlich erhöht und die Frequenz des bodennahen Gitters auf 4 Hz eingestellt (Abb. 10 c). In diesem Fall lässt sich nur die zuvor beschriebene leichte Tendenz der Sedimentation feststellen. Der Wasserkörper an sich bleibt voll durchmischt und es ist eine konstante Massenverteilung über die Tiefe zu erkennen.

3.3 Einfluss von Salz auf die Entwicklung der Partikelgröße

Um den Einfluss von gelösten Salzen auf den Aggregationsprozess abschätzen zu können, wurden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt (siehe auch Teilprojekt 8). Hierzu wurde in einen kleinen Rührtank mit einem Volumen von 1.2 l eine 2 molare $MgSO_4$ -Lösung titriert (Abb. 11). Bei der Titration wurde in 20 Schritten jeweils 5 ml der Lösung zugegeben.

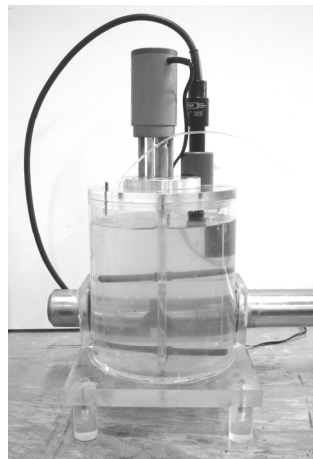


Abb. 11: Rührtank für die Titration mit $MgSO_4$ -Lösung mit installiertem Zugabeschlauch, Leitfähigkeitssonde und In-Line Mikroskop

Das untersuchte Sedimentmaterial wurde bei einer Probenahme in der Elbe in einem Buhnenfeld in der Nähe von Hamburg (siehe Teilprojekt 5) genommen und anschließend gefriergetrocknet. Die Sedimentkonzentration lag bei 250 mg/l. Der Rührer des Tankes drehte mit 38.5 Upm um ein Absetzen des Materials zu verhindern.

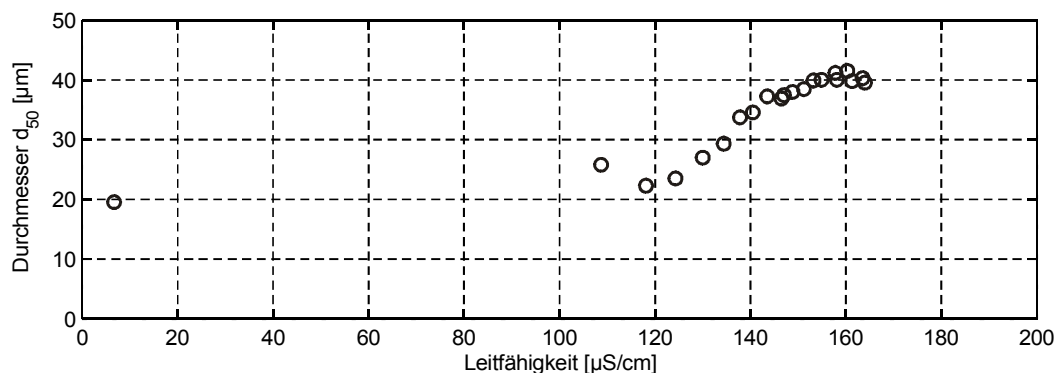


Abb. 12: Veränderung der Partikelgröße von gefriergetrocknetem Elbesediment in einer Konzentration von 250 mg/l durch die Zugabe von 2 molarer $MgSO_4$ -Lösung.

Abb. 12 zeigt den Medianwert d_{50} der volumetrischen Partikelgrößenverteilung gegenüber der Leitfähigkeit der Lösung. Es zeichnet sich eine deutliche Zunahme der Aggregation mit Zunahme der Salzkonzentration und somit der Leitfähigkeit ab. Das weitere Wachstum der Flocken bei einer Leitfähigkeit größer $150 \mu\text{S}/\text{cm}$ wird das Rühren und den damit verbundenen Scherkräften verhindert. Zusätzliche Untersuchungen, bei denen stärker gerührt wurde, waren zwar besser durchmischt. Es konnte allerdings keine Aggregation festgestellt werden, da die erhöhten Scherkräfte und der Rührer die Flocken zerstörten, obwohl das suspendierte Material zu stärkerer Aggregation neigt, wie in Abb. 12 gezeigt.

4 Zusammenfassung

Um das Verhalten von Feinsediment in turbulenter Umgebung ähnlich wie in einer offenen Gerinneströmung untersuchen zu können, wurde eine differentielle Turbulenzsäule konstruiert. In diesem Versuchstand produzieren oszillierende Gitterpaare Turbulenzprofile. Geschwindigkeitsmessungen mittels LDV und PIV zeigen, dass sich die Turbulenz in dem Tank gut kontrollieren lässt. Das Turbulenzprofil lässt sich so einstellen, dass es im Mittel die Bedingungen einer offenen Gerinneströmung wiedergibt. Sekundärströmungen aufgrund von Geometrie und der Anregung durch oszillierende Gitter wurden soweit wie möglich minimiert, so dass diese vernachlässigt werden können.

Unter definierten Turbulenzbedingungen wurde in der differentiellen Turbulenzsäule die zeitliche Entwicklung der Partikelgrößen von Kaolin als Modellfeinsediment lokal in-situ mit einem In-Line Mikroskop ermittelt. Ebenso konnte das sich einstellende Partikelgrößenprofil über die Wassertiefe in Abhängigkeit von der Turbulenz und der Massenkonzentration gemessen werden. Durch unterschiedliche Turbulenzbedingungen konnten auch Aussagen über die Beständigkeit der gebildeten Aggregate getroffen werden.

Gleichzeitig wurden an sieben Positionen kontinuierlich Proben zur Bestimmung der Trübung genommen. Hieraus konnte die Entwicklung des Massenkonzentrationsprofils bestimmt werden. Die Untersuchungen zeigen einen Trend zur Bildung von Aggregaten aus Einzelpartikeln in Bereichen niedriger Turbulenz. Die Größe dieser Aggregate ist bestimmt durch die auftretenden Scherkräfte der turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen und der Verfügbarkeit von Sediment.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Entwicklung von Partikelgrößen und Massenkonzentrationsprofilen dienen zur Kalibrierung von numerischen Modellen (siehe Teilprojekt 14). Durch die Reproduzierbarkeit, die Datendichte und Kontrollmöglichkeiten sind sie hierfür bestens geeignet. Weiterhin geben sie Aufschluss über die

Partikelgrößenverteilung und deren Veränderung in einem natürlichen Fluss, wenn physiochemische Parameter dominieren. Hierbei handelt es sich allerdings um die grundlegenden Prozesse, die in einem natürlichen Fluss von den lokalen Gegebenheiten überlagert werden. Allerdings lassen sich mit den Ergebnissen Grundtendenzen feststellen, welche in die Bewirtschaftung von Flüssen einfließen können.

5 Danksagung

Dieses Projekt wurde im Rahmen des SEDYMO-Verbundprojektes Feinsedimentdynamik und Schadstoffmobilität vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert (Fö-Nr: 02WF0317).

6 Literatur

- Brunk, B., Weber-Shirk, M., Jensen, A., Jirka, G. and Lion, L. W. (1996) Modeling natural hydrodynamic systems with a differential-turbulence column, *J. Hydr. Eng.*, 122, 373-380.
- Brunk, B. (1997) Turbulent Coagulation of Particles Smaller Than the length Scales of Turbulence and equilibrium Sorption of Phenantrene to Clay. Ph.D. Thesis, Cornell University, New York.
- Ditschke, D., Markofsky M. (2006) A non-equilibrium, multi-class flocculation model. Proc. SEDYMO International Symposium 2006, Hamburg.
- Fengler G., Köster M., Meyer-Reil L.-A (2006) Sediment erodibility in an intertidal groyne field of the Elbe river: Impact on microbial mediated processes. Proc. SEDYMO International Symposium, Hamburg.
- Hopfinger, E. J. and Toly, J. A. (1976) Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces, *J. Fluid Mech.*, 78, 155-175.
- Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993) Turbulence in Open-Channel Flow. Rotterdam, Brookfield: A. A. Balkema.
- Srdic, A., Fernando, H. J. S. and Montenegro, L. (1996) Generation of nearly isotropic turbulence using two oscillating grids, *Exp. Fluids*, 20, 395-397.
- Strathmann, M., Griebe, T., & Flemming, H.-C. (2001) Agarose hydrogels as EPS models. *Water Science and Technology*, 43 (6), 169-175.
- van Leussen, W. (1994) Estuarine Macroflocs and their Role in Fine-Grained Sediment Transport. Ph.D. Thesis, University of Utrecht, Utrecht.