

# HIPPO - In-situ-Messgerät zur Analyse der Mobilisierbarkeit von Feinsedimenten

Vorgestellt wird ein innovatives In-situ-Messsystem zur Bestimmung des Erosionsbeginns von Feinsedimenten in Flüssen bzw. Stauräumen, welches im Zusammenhang mit einem aktuellen BMBF-Projekt am KIT entwickelt wurde. Die modulare Bauweise ermöglicht eine Anpassung an verschiedene örtliche Bedingungen. Das Messsystem basiert auf einer Fließgeschwindigkeitsmessung in einem Unterwasserströmungskanal in Kombination mit Trübungsmessungen. Der Versuchsablauf sowie die Erosionsprozesse werden zur Validierung der Messdaten zusätzlich mit Kameras aufgezeichnet.

Peter Oberle, Tim Kerlin, Mark Musall, Thomas Grafmüller und Franz Nestmann

## 1 Hintergrund und Motivation

Natürliche Gewässersysteme sind aufgrund von Sedimentbewegungen in ständiger Umgestaltung und durch Auflandungs- sowie Erosionsvorgänge gekennzeichnet. Durch anthropogene Eingriffe, wie Staubawerke und Flussbegradigungen, werden die morphodynamischen Prozesse nachhaltig beeinflusst, was sich insbesondere in den Bereichen der Schifffahrt, der Energieerzeugung, des Hochwasserschutzes sowie der Gewässerökologie auswirkt. In Stauhaltungen kann der Feststoffeintrag zu einem massiven Verlust des Stauraumvolumens bis hin zu einer Gefährdung des Anlagenbetriebs führen.

Zur Bewertung der Prozesse innerhalb eines Stauraums ist neben der Betrachtung des Sedimentationsverhaltens auch die Untersuchung einer möglichen Remobilisierung der an der Sohle abgelagerten (Fein-) Sedimente, z. B. in Folge erhöhter Abflusszustände oder durch gesteuerte Wasserabgaben am Staubawerk, von Bedeutung. Hierbei ist zu beachten, dass es insbesondere in Bereichen mit (zumindest zeitweise) sehr geringen Fließgeschwindigkeiten zur Bildung von unverfestigten Schlickablagerungen (Flüssigschlick bzw. Fluid Mud) kommen kann, deren komplexe rheologische Eigenschaften die Prognose des Remobilisierungsverhaltens erschweren.

In der Praxis werden zur Bewertung von Remobilisierungs- bzw. Erosionsprozessen überwiegend Schwellenwertansätze verwendet, nach denen Erosion beginnt, sobald die durch die Strömungsbelastung induzierte Sohlenschubspannung einen kritischen Wert überschreitet. Diese kritische Sohlenschubspannung

kann je nach Konsolidierungsgrad und Struktur der Sohle eine starke lokale und zeitliche Variabilität aufweisen. Zahlreiche Forschungsarbeiten versuchen daher diese kritische Sohlenschubspannung für Erosion mit bodenmechanischen und anderen physikochemischen Parametern zu korrelieren. Diesbezüglich konnte bisher jedoch kein allgemeingültiger Zusammenhang in die in der Praxis eingesetzten Modellverfahren integriert werden. Bei in der Literatur vorgestellten experimentellen Untersuchungen wird der Beginn der Erosion detektiert und einer Grenzbelastung zugeordnet. Die Betrachtung der dabei ermittelten kritischen Sohlenschubspannungen zeigt jedoch eine deutliche Spanne zwischen den unterschiedlichen veröffentlichten Literaturwerten (**Tabelle 1**).

Vor diesem Hintergrund ist für eine belastbare praxisorientierte Analyse des Remobilisierungs- bzw. Erosionsverhaltens von Feinsedimenten meist eine individuelle Labor- und/oder In-situ-Untersuchung notwendig. Während bei den Laboruntersuchungen die Proben durch deren Entnahme sowie den Transport und den Wiedereinbau im Labor mehr oder weniger stark gestört sind und somit die Ergebnisse beeinflusst werden, bieten In-situ-Messungen prinzipiell das Potenzial einer weitgehend ungestörten Bestimmung des Transportbeginns direkt an der Gewässersohle. Aufgrund dessen wurde am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekts iWaGSS (Integrated Water Governance Support System; FKZ: 02WGR1424A) ein Messsystem weiterentwickelt, welches im Folgenden vorgestellt wird.

### Kompakt

- Es wurde ein In-situ-Messsystem zur zuverlässigen Bestimmung des Erosionsbeginns von Feinsedimenten ( $d_m < 2 \text{ mm}$ ) in Gewässern entwickelt.
- Über Videokameras kann der Erosionsvorgang in Echtzeit beobachtet werden.
- Die kompakte, modulare Bauweise ermöglicht ein breites Einsatzspektrum.

## 2 Konzept und Entwicklung

### 2.1 Das Messgerät

Das messtechnische Konzept wurde vom IWG als Prototyp bereits im Jahr 2012 realisiert, um die Erosionsgefährdung abgelagerter Schlickschichten vor dem Hintergrund einer geplanten Kühlwasserrückgabe eines thermischen Kraftwerks zu analysieren. Im Rahmen begleitender Grundlagenversuche wurde dabei die In-situ-Messapparatur in Form eines Unter-

**Tabelle 1:** Literaturwerte zu kritischen Sohlenbelastungen bei unterschiedlichen Feinsedimentuntersuchungen (Quelle: KIT/IWG)

Autor	Untersuchungsgebiet	Schlammtyp	Untersuchungsart	Kritische Sohlenschubspannung $\tau_{krit}$ [N/m <sup>2</sup> ]
Aberle et. al. [1]	Fluss bei Christchurch, Neuseeland	mäßig konsolidierter dichter Fluid Mud	In situ (transportables Gerinne)	~0,1-0,5
Araújo et. al. [2]	Cavado, Portugal	0-0,3 mm	Laborversuche (Kreisgerinne)	~0,05-0,6
Ravens & Gschwend [3]	Quincy Bay, Boston Harbor, USA	Probe 1: $D_{50} = 0,06$ mm Probe 2: $D_{50} = 0,03$ mm Probe 3: $D_{50} = 0,05$ mm	In situ (transportables Gerinne)	~0,015-0,12 ~0,04-0,09 ~0,03-0,08
Schaaf et. al. [4]	Golfe de Fos (Röhne), Frankreich	0-5 mm	Laborversuche (Rezirkulationsgerinne), in situ (ADCP/Messboje)	~0,02-0,05
Tollhurst et. al. [5]	Humber Ästuar, Yorkshire, England	Ästuarsediment	In situ (verschiedene Messverfahren)	~0,19-0,26
Westrich et. al. [6]	Neckarstauhaltung Lauffen, Deutschland	Neckarsediment	Laborversuche	~0,5-2 (10)
Widdows [7]	Calstock (Tamar Ästuar) und St. John's Lake, England	Ästuarsediment	Laborversuche, in situ (verschiedene Messverfahren)	~0,1-0,5

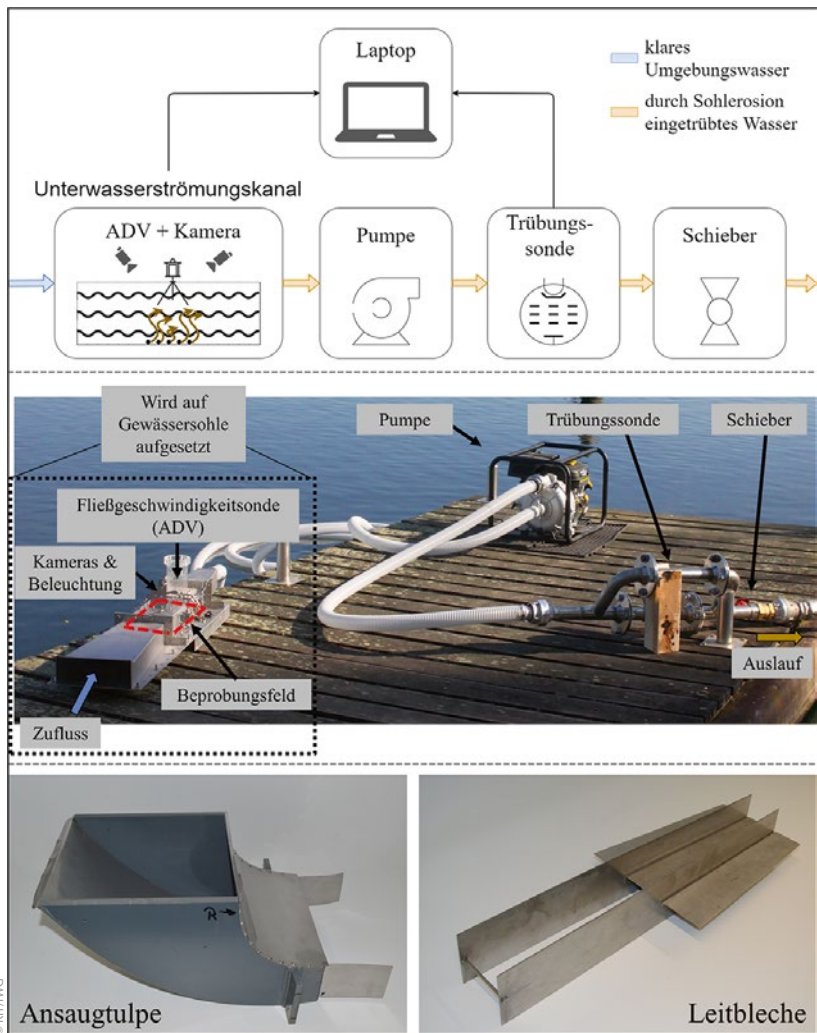
wasserströmungskanal zur Erfassung belastbarer kritischer Strömungsgeschwindigkeiten resp. kritischer Schubspannungen für die betroffenen Sedimentablagerungen entwickelt (**Bild 1 oben**). Aufgrund der großen Abmessungen sowie dem hohen Eigengewicht des Messsystems wurde jedoch eine relativ aufwändige Infrastruktur für den Transport sowie den Einsatz vor Ort benötigt. Dadurch war die Anwendung auf wenige, gut zu erreichende und technisch entsprechend ausgerüstete Standorte eingeschränkt.

Im Rahmen des Verbundprojekts iWaGSS wird seit 2017 die Stauhaltung Phalaborwa Barrage am Olifants River in Südafrika, welche der lokalen Trink- und Brauchwasserentnahme dient, hydraulisch und morphodynamisch modelliert und analysiert. Diese ist durch einen massiven Eintrag an Feinpartikeln verbunden mit einem starken Verlust an Stauraumvolumen (derzeit ca. 90 % Verlandung) gekennzeichnet. Aufgrund der Lage des Projektgebietes direkt oberstrom des Kruger-Nationalparks ist sowohl die Bewertung als auch die Optimierung von wasserwirtschaftlichen Maßnahmen dort zudem auch vor einem ökologischen Hintergrund erforderlich. Hierbei ist man auf morphologische Prognosen angewiesen, welche angesichts der Komplexität der Prozesse mittels mehrdimensionaler numerischer Feststofftransportmodelle analysiert werden. Die Identifizierung und modelltechnische Abbildung der für die Feststofftransportmodellierung maßgebenden hydro- und morphodynamischen Prozesse ist dabei die Grundvoraussetzung zur Gewährleistung der geforderten Prognosefähigkeit. Zur Bestimmung der benötigten kritischen Fließgeschwindigkeiten und Schubspannungen zur Mobilisierung der Sohle wurde daraufhin die In-situ-Messapparatur vor allem mit Bezug auf Größe, Gewicht und Flexibilität neu konzipiert. Anschließend wurde das neue System HIPPO (Hydro-morphological Investigation of Riverbed Particle Performance On-site) in modularer Bauweise umgesetzt (**Bild 1 unten**).

## 2.2 Funktionsweise, Aufbau und Einsatzmöglichkeiten

Die Funktionsweise wird im Folgenden an einer Schemaskizze (**Bild 2 oben**) erläutert und kann parallel anhand des Messaufbaus nachverfolgt werden (**Bild 2 Mitte**). Auf die Gewässer- sohle wird ein Unterwasserströmungskanal, welcher zur Sohle einen fest definierten, nach unten geöffneten Messquerschnitt


**Bild 1:** Gegenüberstellung des Prototypen (oben) und des neu entwickelten Messsystems HIPPO (unten)



**Bild 2:** Schemaskizze des Messsystems HIPPO (oben), Systemaufbau im Einsatz (Mitte) und Detailansicht der Ansaugtulpe (unten links) und der Leitbleche (unten rechts)

(0,40 m x 0,15 m) besitzt, aufgesetzt. Der Unterwasserströmungskanal ist über ein Schlauchsystem an eine Pumpe angeschlossen. Mit Hilfe der Pumpe kann sohlennah eine definierte Fließgeschwindigkeit induziert werden, welche schrittweise erhöht wird. Diese wird punktuell mittig über dem Beprobungsfeld mit einem eingebauten Fließgeschwindigkeitsmessgerät (Acoustic Doppler Velocimeter) überwacht und gespeichert. Der gesamte Vorgang wird zusätzlich visuell mit Kameras erfasst. Parallel wird die Trübung des abgesaugten Wassers kontinuierlich mit einem hinter die Pumpe geschalteten Trübungssensor gemessen und mit der Einheit Nephelometric Turbidity Unit (NTU) ausgegeben. Hinter der Trübungssonde wird der durch die Pumpe induzierte Abfluss über einen Schieber justiert. Anschließend wird das angesaugte Wasser dem Gewässer in ausreichend großer Entfernung zur Messstelle rückgeführt.

Mit der derzeitigen installierten Pumpe können Fließgeschwindigkeiten von bis zu  $v = 0,8 \text{ m/s}$  im Messquerschnitt erreicht werden, was für die Bestimmung der kritischen Fließgeschwindigkeit der Sohlenerosion von tonigen, schluffigen und feinsandigen Sedimenten ausreichend ist. In Abhängigkeit der vorliegen-

den Sedimentbeschaffenheit können weitere Bauteile, wie Steckbleche oder Auflagebleche angesetzt werden. Für den Einsatz insbesondere bei stark verflüssigten Schlickablagerungen kann an der Zulaufseite eine Ansaugtulpe (**Bild 2 unten links**) angebracht werden. Hierdurch wird sichergestellt, dass nur sohlenferneres klareres Wasser angesaugt wird und es zu keinen Fehlinterpretationen der Messergebnisse bedingt durch das Einsaugen von außerhalb des Geräts mobilisierten Sohlenablagerungen kommt. Zur Beschränkung eventueller, insbesondere durch diese Umlenkung verursachter Sekundärströmungen im Kanal wurde eine interne Leitapparatur für den Zuströmbereich entwickelt (**Bild 2 unten rechts**). Aufgrund der flexiblen Bauart kann das Gerät individuell auf die Sohlengegebenheiten vor Ort angepasst werden und erlaubt ein breites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten.

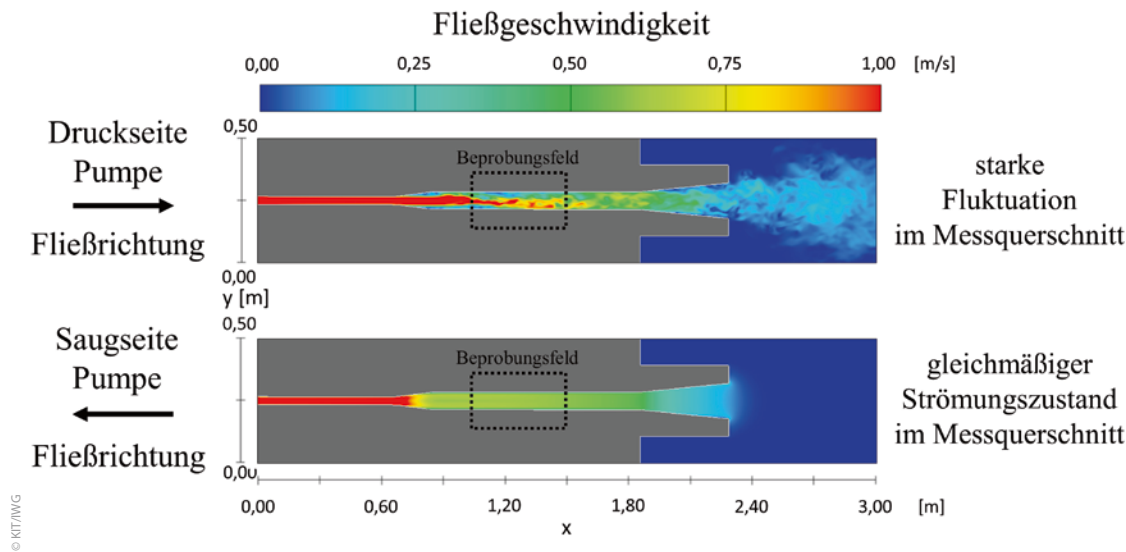
### 2.3 Strömungsanalyse auf Basis eines 3-D-Strömungsmodells

Während des Entwicklungsprozesses wurde zur Bauteiloptimierung und Sicherstellung einer zielgerichteten Funktionsweise eine umfassende CFD-Simulationsstudie (3 D) durchgeführt. Neben der Optimierung des geometrischen Designs wurde auch die ideale Anordnung der Pumpe modelltechnisch untersucht. Hierfür wurde der Unterwasserströmungskanal alternativ sowohl auf der Saug- als auch auf der Druckseite der Pumpe angeordnet, um das dadurch veränderte Strömungsverhalten im Messquerschnitt zu analysieren (**Bild 3**). Das Anordnen des Untersuchungsfeldes auf der Druckseite der Pumpe führte zu einem stark fluktuierenden Fließverhalten, welches durch

Ablösungen im Bereich der Vergrößerung des Fließquerschnitts und die damit einhergehenden Turbulenzeffekte bedingt ist. Bei der ansaugenden Variante zeigt sich demgegenüber eine gleichmäßige, gleichgerichtete Anströmung, welche durch die Beschleunigungswirkung hervorgerufen wird. Da für die Untersuchungen ein stabil zu kontrollierender und gleichmäßiger Strömungszustand erwünscht ist, wurde die ansaugende Variante umgesetzt. Unvermeidliche kurzzeitige Druckspitzen, die bei Fließgeschwindigkeitsänderungen auftreten, müssen bei der Ergebnisinterpretation beachtet werden.

### 3 Ergebnisdarstellung und Interpretation

Die maßgebliche Fließgeschwindigkeit des Transportbeginns kann auf Basis der Trübung des abgepumpten Wassers in Kombination mit der Fließgeschwindigkeitssonde ermittelt werden. Zur Validierung bzw. Erhöhung der Interpretierbarkeit der gemessenen Trübungswerte werden vier Kameras (zwei davon mit Liveübertragung) eingesetzt. Eine der Kameras mit Liveübertragung



**Bild 3:** Gegenüberstellung von CFD-Simulationen zur Anordnung des Messkanals auf der Druck- oder Saugseite der Pumpe

filmt das Messsystem aus einer Vogelperspektive, um den Aufsetzvorgang auf die Sohle zu dokumentieren. Die weitere Kamera mit Liveübertragung ist direkt auf das Beprobungsfeld gerichtet und dient der Versuchsüberwachung. Die anderen beiden Kameras zeichnen zusammen das Beprobungsfeld über die gesamte Versuchsdauer auf. Die Auswertmöglichkeiten werden im Folgenden anhand zweier Messkampagnen exemplarisch dargestellt.

### 3.1 Untersuchung im Altrhein bei Wintersdorf (visuelle Auswertung)

Die Aufnahmen in **Bild 4** stammen aus einer Versuchsreihe bei der die Sohlenstabilität des Altrheinarms bei Wintersdorf bestimmt werden sollte. Hintergrund der Untersuchung war die Fragestellung, inwieweit eine mögliche Erhöhung der Dotierwassermenge in den Altrhein die dortigen morphologischen Prozesse beeinflusst. Die Beprobung fand im ständig wasserführenden Teil des Altrheins bei <math>< 2\text{ m}</math> Wassertiefe statt. Der gesamte Erosionsprozess und insbesondere der Transportbeginn wurden unter anderem anhand des Videomaterials ausgewertet. In **Bild 4** sind drei charakteristische Zeitpunkte einer Messung dargestellt. Zunächst ist der ungestörte Sohlenaufbau direkt nach dem Aufsetzen ( $t = 0\text{ min}$ ) des Messsystems zu erkennen. Im nächsten Foto ( $t = 14\text{ min}$ ) ist die fortlaufende Erosion mit starkem Materialaustag zu beobachten. Wohingegen im letzten Foto der erodierte Sohlenaufbau mit deutlichen Erosionserscheinungen nach Versuchsende ( $t = 25\text{ min}$ ) sichtbar wird. Als kritische Geschwindigkeit, welche zum Erosionsbeginn führt, konnten  $v_{\text{krit}} = 0,5\text{ m/s}$  ermittelt werden.

### 3.2 Untersuchungen in der Phalaborwa Barrage, Südafrika

Im Folgenden werden die Ergebnisse für zwei exemplarische Messpunkte aus der iWaGSS-Kampagne dargestellt und erläutert. Aufgrund der modularen Bauweise war ein problemloser Transport des zerlegten Messsystems nach Südafrika möglich. Zunächst wurde das HIPPO im „Trockenen“ aufgebaut (**Bild 5 oben links**) und die gesamte Elektronik einem Testlauf unter-

zogen. Um ein Einsinken des Unterwasserströmungskanals im teilweise stark verflüssigten Sediment zu verhindern, wurde außerdem ein Auflageblech zur Vergrößerung der Kontaktfläche angebaut. Nach dem erfolgreichen Testlauf wurde das HIPPO an einer Winde außerhalb des Messboots befestigt und konnte so einsatzbereit zu den Messstellen mit Wassertiefen von 0,5-7 m transportiert werden. Für Evaluationszwecke wurden sowohl Versuche ohne Ansaugtulpe (**Bild 5 unten**) als auch mit Ansaugtulpe (**Bild 5 oben rechts**) durchgeführt. Eine Messung dauerte dabei je nach Set-up zwischen 25-40 min.

**Bild 6** zeigt exemplarische Messergebnisse. Zu deren Auswertung wird die Fließgeschwindigkeit im Messquerschnitt (blau) mit der gemessenen Trübung (braun) zeitlich überlagert. Das obere Diagramm (Messpunkt 1) bezieht sich auf eine Messung in einem Bereich mit vergleichsweise frisch abgelagerten Sedimenten (**Bild 6 oben**), welche aus einem Anteil >99 % aus Ton und Schluff (Korngrößen <math>< 0,063\text{ mm}</math>) bestanden. Der organische Anteil lag bei ca. 12 % und die nasse Schüttdichte bei  $1,23\text{ g/cm}^3$ . Gut zu erkennen ist die stufenweise Erhöhung der Fließgeschwindigkeit in Schritten von  $\Delta v = \text{ca. } 5\text{ cm/s}$ . Bei Betrachtung der Trübung ist der erste Peak (ca. 470 NTU) bei einer vorliegenden Fließgeschwindigkeit von ca. 0,07 m/s festzustellen. Hierbei handelt es sich um den auf der Schluffsohle anstehenden stark verflüssigten Fluid Mud, welcher direkt zu Beginn der Messungen mobilisiert wurde. Eine weitere schrittweise Erhöhung der Fließgeschwindigkeit führt erst ab ca. 0,3 m/s zu einem erneuten starken Ansteigen der Trübung (ca. 600 NTU). Bei jeder weiteren Erhöhung der Fließgeschwindigkeit ist ein weiterer Trübungsausgang mit anschließender Annäherung an die Grundtrübung zu beobachten. Dies lässt sich damit erklären, dass nach dem Erodieren der obersten Schicht jeweils die darunter liegende Schicht freigelegt wird, welche stärker konsolidiert ist. Im Diagramm ist weiterhin bei ca. 0,5 m/s ein Absinken der gemessenen Fließgeschwindigkeit (bei gleichbleibendem Pumpendurchfluss) zu erkennen, da durch die starken Erosionen der durchflossene Querschnitt vergrößert wird. Zusammenfassend lässt sich folglich festhalten, dass in diesem Fall der Fluid Mud bereits bei



**Bild 4:** Aufnahmen der Sohle zu verschiedenen Zeitpunkten

Fließgeschwindigkeiten  $< 0,07$  m/s ausgetragen wird, eine flächige Erosion ab Fließgeschwindigkeiten von  $0,3$  m/s auftritt und ab einer Schwelle von  $0,4$ - $0,5$  m/s starke Erosion mit signifikantem Massenaustrag festzustellen ist.

Analog lässt sich das Ergebnis eines zweiten Messpunktes (**Bild 6 unten**) an einer Stelle im Hauptfließweg, d. h. im ständig durchströmten Bereich des Stauraums interpretieren. Die Sedimentbeprobung ergab einen Ton- und Schluffanteil ( $< 0,063$  mm) von ca. 98 %. Auch hier wird zu Beginn bei sehr geringen Fließgeschwindigkeiten ( $< 0,05$  m/s) zunächst das Mobilisieren des Fluid Muds ersichtlich. Bei weiterer Steigerung der Fließgeschwindigkeit ist erkennbar, dass in diesem Fall signifikante Erosionsvorgänge erst ab ca.  $0,6$  m/s eintreten.

### 3.3 Übertragung auf numerische Simulationsstudien

Beim Einsatz numerischer Strömungsmodelle zur Analyse von Remobilisierungs- bzw. Erosionsprozessen erfolgt die Steuerung bzw. Bewertung i. d. R. über die Vorgabe einer kritischen Sohlschubspannung. Daher müssen die in situ gemessenen Schwellenwerte der Fließgeschwindigkeit für morphodynamische Unter-



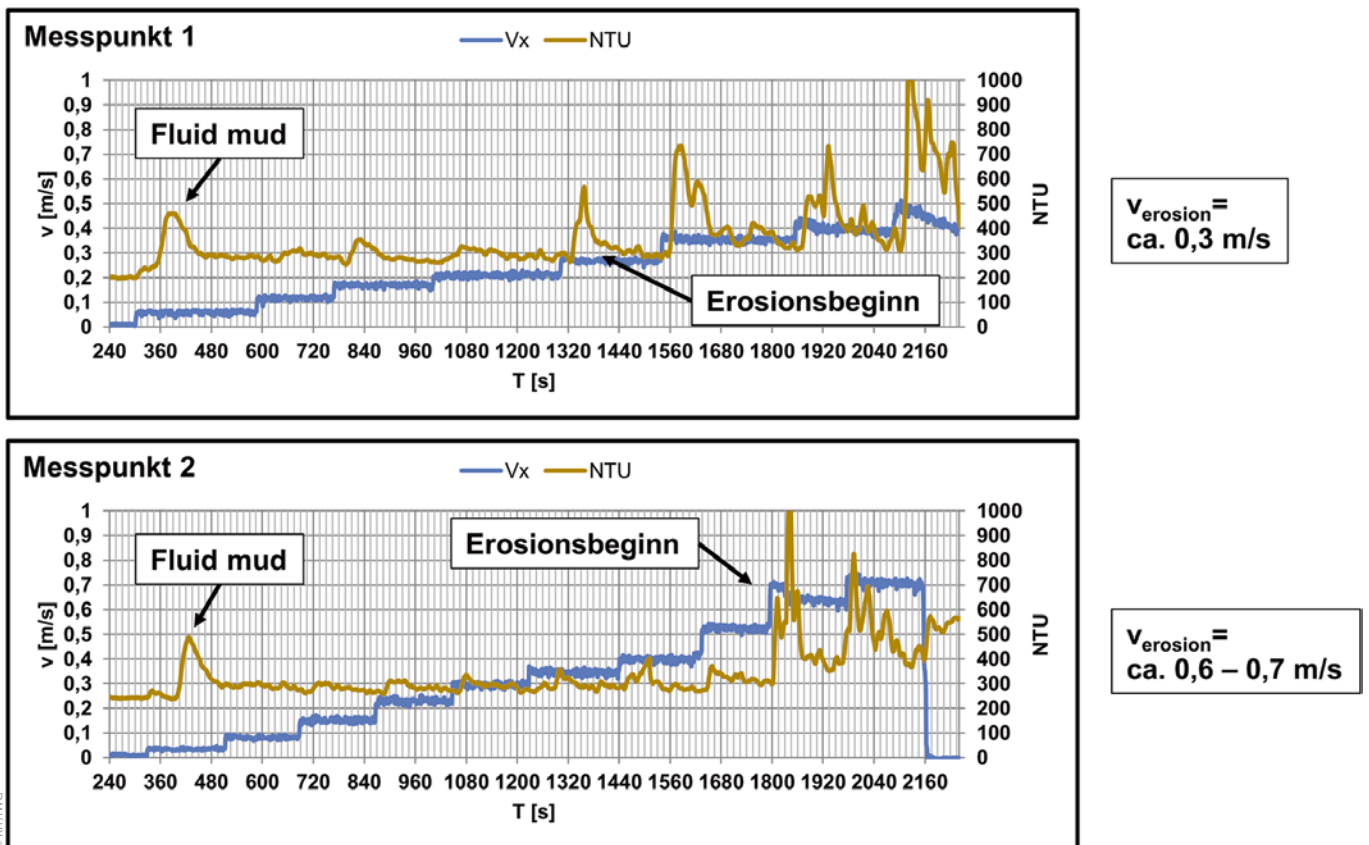
**Bild 5:** Eindrücke aus den iWaGSS-Messkampagnen: Darstellung des gesamten Messsystems (oben links), kritische Beobachter am Ufer (oben rechts), Fahrt zum nächsten Messpunkt (unten)

suchungen in Sohlschubspannungen umgerechnet werden, was z. B. über den ursprünglich aus der Rohrhydraulik stammenden quadratischen Geschwindigkeitsansatz erfolgen kann:

$$\tau = \frac{\rho \cdot \lambda \cdot v_{\text{mittel}}^2}{8}; \lambda = f(k_s, D, Re) \quad (1)$$

Bei Anwendung dieser Werte ist darauf zu achten, dass die Vergleichbarkeit mit den im numerischen Modell hinterlegten Ansätzen zur Bestimmung der Sohlschubspannung gegeben ist.

Die Bestimmung des dazu erforderlichen Widerstandsbeiwerts  $\lambda$  erfolgt dabei in Anlehnung an das Moody-Diagramm, wobei der benötigte Parameter  $k_s$  über Sohlenproben bestimmt und  $D$  über den hydraulischen Radius des Messquerschnitts approximiert wird. Hierbei sollte jedoch berücksichtigt werden, dass diese Vorgehensweise in Bezug auf das vorgestellte Messsystem gewisse Unsicherheiten birgt. So liegt man bezogen auf das HIPPO-Messsystem im Moody-Diagramm je nach Geschwindigkeit und Sohlschubspannung bei Reynoldszahlen von ca.  $2 \cdot 10^4$  bis  $4 \cdot 10^4$  und somit im Übergangsbereich, wohingegen in natürlichen Gewässern eher  $Re$ -Zahlen  $> 10^6$  vorliegen. Zudem stellt sich im Messsystem aufgrund des rechteckigen Strömungsquerschnitts sowie der unterschiedlichen Rauheiten von Gewässer- und Messsystemsohle und Berandungen (Seitenwände aus Blech/Plexiglas; Decke aus Blech/Plexiglas) keine gleichmäßige Schubspannungsverteilung ein und prinzipiell müssten für die einzelnen Teilflächen



**Bild 6:** Ergebnisdiagramme für eine Messstelle in einer frischen Ablagerungszone (oben) und in einem häufig mit höheren Fließgeschwindigkeiten durchströmten Bereich (unten)

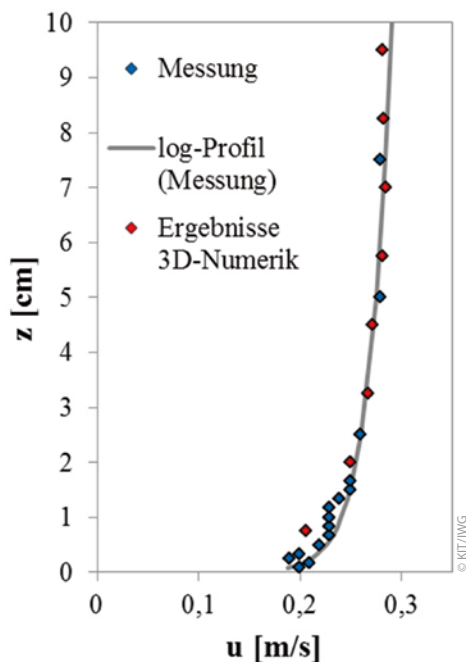
jeweils unterschiedliche Verlustbeiwerte  $\lambda_1$  vorgegeben werden. Für Feinsedimente im Bereich  $<2$  mm ist jedoch davon auszugehen, dass diese Unsicherheiten keine signifikanten Auswirkungen auf die ermittelten Grenzwerte haben und im Vergleich zu den Gesamtunsicherheiten morphodynamischer Analysen gering sind. Mögliche zusätzliche Einflussfaktoren der großräumigen Strömungscharakteristik, wie z. B. turbulente Schwankungsgrößen (TKE) oder die vertikale Geschwindigkeitskomponente, werden aufgrund der räumlichen Ausdehnung des Messsystems nicht erfasst und sollten bei der Gesamtbeurteilung der Messergebnisse ggf. qualitativ berücksichtigt werden.

Soll die Prognose von Mobilisierungsvorgängen auf Basis simulierter Fließgeschwindigkeiten bzw. deren Vergleich mit den In-situ-Messungen (Messung in einer Höhe von ca. 4 cm über der Sohle) erfolgen, muss zwischen 2-D- und 3-D-Simulationsmodellen unterschieden werden. Da 2-D-Strömungsmodelle nur tiefengemittelte Ergebnisse liefern und es bei 3-D-Simulationen insbesondere bei praxisbezogenen Fragestellungen mit Modellausdehnungen von mehreren Quadratkilometern und mehreren Millionen Berechnungszellen zu Einschränkungen bzw. Unsicherheiten bei der sohlennahen Fließgeschwindigkeitsbestimmung kommt, ist eine Anpassung der Simulationsergebnisse auf die entsprechenden sohlennahen Werte erforderlich. Nur bei sehr feiner Gitterauflösung kann über einen 3-D-Ansatz die sohlennahe Fließgeschwindigkeit realitätsnah abgebildet werden. In diesem Zusammenhang konnte anhand des Vergleichs von

unterschiedlichen Geschwindigkeitsmessungen und hoch aufgelösten 3-D-Simulationsergebnissen gezeigt werden, dass die vertikale Geschwindigkeitsverteilung über einer Feinsedimentsohle recht gut mit dem theoretischen Ansatz eines über die gesamte Wassertiefe angenommenen logarithmischen Geschwindigkeitsprofils übereinstimmt (**Bild 7**), bei welchem die mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_{\text{mittel}}$  bei einer Wassertiefe von ca. 0,37 h vorliegt. Legt man diese Näherung zugrunde, können die sohlennahen Fließgeschwindigkeiten aus tiefengemittelten Werten von 2-D- und bei Bedarf auch 3-D-Simulationsergebnissen unter Berücksichtigung des Sohlenabstands der berechneten Werte über die Annahme eines logarithmischen Geschwindigkeitsprofils hergeleitet werden. Werden die über die Tiefe variierenden Simulationsergebnisse einer 3-D-Simulation verwendet, so ist für die Berechnung der sohlennahen Geschwindigkeit durch den Modellierer die Fließgeschwindigkeit in einer geeigneten Tiefe mit möglichst hoher Belastbarkeit zu wählen und anschließend ggf. über weitere Stützpunkte zu validieren.

#### 4 Zusammenfassung

Zur Unterstützung morphologischer bzw. morphodynamischer Untersuchungen wurde ein variabel einsetzbares System entwickelt, welches In-situ-Messungen zum Remobilisierungsverhalten von Feinsedimentablagerungen unter realen Bedingungen



**Bild 7:** Vergleich vertikaler Geschwindigkeitsprofile aus Messung, Numerik und theoretischem Ansatz

(ungestörte Natursohle, „echtes“ Flusswasser) ermöglicht. Die Belastbarkeit der ermittelten Grenzgeschwindigkeiten ist aufgrund der kombinierten Messmethodik aus Fließgeschwindigkeits- und Trübungsmessungen sowie einer visuellen Validierung des Geschehens für praktische Fragestellungen ausreichend. Die Messergebnisse unterstützen Planungen durch Vergleiche mit berechneten Fließgeschwindigkeiten in Bezug auf vorgegebene Abflusszenarien. Insbesondere für kohäsive Sedimente stellen die gemessenen Naturwerte einen deutlichen Mehrwert gegenüber gängigen Abschätzungen auf Basis von Literaturangaben und nur teilweise bekannten Sohlenparametern dar, da auch vergleichsweise schwer zu parametrisierende Faktoren, wie Konsolidierungsgrad, Bewuchs sowie weitere biogene bzw. biochemische Eigenschaften der Sohle, den Erosionszeitpunkt beeinflussen können. Gerade vor diesem Hintergrund erscheinen mögliche Auswirkungen der Übertragung der

Peter Oberle, Tim Kerlin, Mark Musall, Thomas Grafmüller and Franz Nestmann

#### **HIPPO - Hydro-morphological investigation of riverbed particle performance on-site**

An innovative in situ use measuring device adjustable to local conditions and aiming at determining the start of erosion of fine sediments at the riverbed has been developed. It allows a reliable use for a wide range of application areas like rivers or reservoirs with various sediments (clay, silt and fine sand). It is based on a combined measuring methodology from flow velocity and turbidity measurements as well as a visual validation of the event. The determined threshold values for the start of transport can be used in subsequent morphodynamic CFD-simulations as an input quantity (in terms of critical bed shear stress) or limit values and therefore are of crucial importance.

hydraulischen Größen vom Messsystem (Geometrie, Geschwindigkeitsprofil) auf die reale bzw. simulierte Strömung im Vergleich zu den allgemeinen Unsicherheiten praxisorientierter morphodynamischer Analysen gering. Zudem tragen die aus den Messungen abgeleiteten Parameter aufgrund der höheren Naturähnlichkeit dazu bei, den Kalibrierungsaufwand bei der morphodynamischen Modellierung zu reduzieren.

#### **Autoren**

**Dr.-Ing. Peter Oberle**

**Tim Kerlin, M. Sc.**

**Dr.-Ing. Mark Musall**

**Dipl.-Ing. Thomas Grafmüller**

**Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Franz Nestmann**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG)

Kaiserstraße 12

76131 Karlsruhe

peter.oberle@kit.edu

tim.kerlin@kit.edu

mark.musall@kit.edu

thomas.grafmueller@kit.edu

franz.nestmann@kit.edu

#### **Literatur**

- [1] Aberle, J.; Nikora, V.: Straight Benthic Flow-Through Flume for In Situ Measurement of Cohesive Sediment Dynamics. In: *Journal of Hydraulic Engineering* (2003), Vol. 129, No. 1.
- [2] Araújo, M. A. V. C.; Teixeira, J. C. F.; Teixeira, S. F. C. F.: Application of laser anemometry for measuring critical bed shear stress of sediment core samples. In: *Continental Shelf Research* (2008), No. 28.
- [3] Ravens, M.; Gschwend, M.: Flume Measurements of Sediment Erodibility in Boston Harbor. In: *Journal of Hydraulic Engineering* (1999), Vol. 125, No. 10.
- [4] Schaaf, E.; Grenz, C.; Pinazo, C.; Lansard, B.: Field and laboratory measurements of sediment erodibility: A comparison. In: *Journal of Sea Research* (2006), No. 55.
- [5] Tollhurst, T.J. et al.: A comparison and measurement standardisation of four in situ devices for determining the erosion shear stress of intertidal sediments. In: *Continental Shelf Research* (2000), No. 20.
- [6] Westrich, B. et al.: Mobilität von Schadstoffen in den Sedimenten staugeregelter Flüsse, Dynamik und Bilanzierung von Schwebstoffen und Schwermetallen in einer Stauhaltungskette. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS, Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, 2000.
- [7] Widdows, J. et al.: Inter-comparison between five devices for determining erodability of intertidal sediments. In: *Continental Shelf Research* (2007), No. 27.

 **SpringerProfessional.de**

Feinsedimente



Scheer, C.; Panckow, N.; Pinz, K.: Feinsedimenteinträge in die Fließgewässer Südostniedersachsens. In: *Wasser, Energie und Umwelt*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.  
[www.springerprofessional.de/link/12350152](http://www.springerprofessional.de/link/12350152)

Lothmann, R.: Lösungsstrategien für die Sedimentationsproblematik an der Wahnbachtalsperre. In: *WasserWirtschaft*, Ausgabe 5/2020. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020.  
[www.springerprofessional.de/link/17920824](http://www.springerprofessional.de/link/17920824)