Neue Entwicklungen im wasserbaulichen Modellversuchswesen zum Sedimenttransport

Christine Sindelar · Johannes Schobesberger · Petr Lichtneger · Christoph Hauer · Helmut Habersack

Online publiziert: 6. Februar 2019
 © Der/die Autor(en) 2019

Zusammenfassung In diesem Beitrag werden aktuelle Entwicklungen im Modellversuchswesen zum Sedimenttransport anhand von drei konkreten Forschungsarbeiten vorgestellt. Neue messtechnische Entwicklungen im Bereich der berührungslosen laser-optischen Verfahren ermöglichen es, in einem Messvolumen räumlich und zeitlich hochaufgelöste 3D-Geschwindigkeiten zu messen (tomo-PTV = tomographic Particle Tracking Velocimetry). Der STB-Algorithmus (Shake the Box) ist eine Weiterentwicklung der PTV-Methode, der die Auswertezeiten stark verkürzt, was angesichts der großen Datenmengen bei hochaufgelösten Messungen von großem Wert ist. Eine im Beitrag präsentierte Forschungsarbeit untersucht mithilfe der tomo-PTV-Methode die Strömung rund um einen Einzelstein. Die bei Bewegungsbeginn vorhandenen und möglicherweise bewegungsauslösenden kohärenten Strukturen konnten gemessen und visualisiert werden. In einem weiteren Vorhaben wurde die Messung der Strömung mit der Messung von sich an der Sohle bewegenden Sedimentkörnern gekoppelt. Dadurch konnte ein Beitrag zu der immer noch offenen Forschungsfrage geliefert werden, ob Sedimenttransport den Sohlwiderstand erhöht oder verringert. Als dritte Forschungsarbeit werden Skalierungsversuche beschrieben, die das Ziel haben, Skalierungsfehler über Kiessohlen zu quantifizieren. Dazu wird eine Modell-

familie in drei Maßstäben untersucht. Für die 1:1-Versuche stand das neue BOKU-Freiluft-Forschungserinne zur Verfügung, das mit Donauwasser gespeist wird und im Endausbau Durchflüsse bis zu 10 m³/s ohne Pumpen erlaubt. Die neuen messtechnischen Entwicklungen haben in Kombination mit Versuchsanlagen im oder nahe dem Naturmaßstab das Potenzial, das physikalische Prozessverständnis zum Sedimenttransport substanziell voranzutreiben. Auf Basis dessen können effiziente Sedimentmanagement-Strategien für die wasserbauliche Praxis entwickelt werden.

Schlüsselwörter

Modellversuchswesen · Tomo-PTV-Messung · Bewegungsbeginn · Sohlwiderstand · Skalierungsfehler

New developments in physical hydraulic modeling for sediment transport

Abstract This paper presents new developments in physical modeling of sediment transport based on three specific research projects. New developments in the field of non-invasive laser-optical methods allow to measure spatially and temporally high-resolution 3D velocities in a measuring volume (tomo-PTV = tomographic particle tracking velocimetry). The STB (Shake the Box) algorithm is a further development of the PTV method, which greatly shortens the evaluation time. This is of great value given the large amounts of data in high-resolution measurements. The first project presented in this paper investigates the flow around a single stone using the tomo-PTV method. The coherent structures that were present at the onset of motion—and possibly caused movement—could be measured and visualized. In a second project, flow measurements were coupled with the measurement of moving sediment grains along the rough bed. The results are a contribution to the still open

research question as to whether sediment transport increases or decreases bed resistance. As a third project scaling experiments are described which aim to quantify scaling errors in gravel bed rivers. For this purpose, a model family is examined in three different scales. For the 1:1 experiments, the new open-air BOKU research channel was available, which is fed with Danube water and will finally allow flow rates of up to 10 m³/s without pumping. Recent developments in measurement techniques in combination with experimental facilities at or near field scale have the potential to substantially advance the physical process understanding of sediment transport. Based on this, efficient sediment management strategies for hydraulic engineering practice can be developed.

1 Modellversuchswesen – quo vadis?

Das wasserbauliche Modellversuchswesen blickt auf eine etwa 130-jährige Tradition zurück. Ende des 19. Jahrhunderts führte Osborne Reynolds seine berühmten Fadenversuche durch, um den Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung visuell zu untersuchen (Reynolds 1883). Etwa zur selben Zeit fanden bspw. an der TU Dresden unter Prof. Engels und an der TU Graz unter Prof. Forchheimer erste Modellversuche statt (Kobus 1984 bzw. <http://www.hydro.tugraz.at>, aufgerufen am 02.03.2015). Zu dieser Zeit war die theoretische 3-dimensionale Beschreibung der Strömung von viskosen, Newton'schen Flüssigkeiten in Form der Navier-Stokes-Gleichungen bereits mehrere Jahrzehnte bekannt. Diese nicht-linearen partiellen Differenzialgleichungen lassen sich bis auf wenige, stark vereinfachte Strömungen bis heute nicht analytisch lösen. Ohne Computer und die entsprechenden numerischen Verfahren hatten die Navier-Stokes-Gleichungen am beginnenden 20. Jahrhundert keine praktische Be-

DI Mag. Dr. C. Sindelar (✉) ·
 J. Schobesberger · DI Dr. P. Lichtneger ·
 PD DI Dr C. Hauer ·
 Univ.-Prof. DI Dr H. Habersack
 Department für
 Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut
 für Wasserbau, Hydraulik und
 Fließgewässerforschung, Christian
 Doppler Labor für Sedimentforschung
 und -management, Universität
 für Bodenkultur Wien,
 Muthgasse 18, Wien, Österreich
christine.sindelar@boku.ac.at

deutung für wasserbauliche Problemstellungen. Umso schneller entwickelte sich das wasserbauliche Modellversuchswesen, das sich rasch als anerkannte Methode des Ingenieurwesens zur Entwicklung praktischer wasserbaulicher Lösungen etablierte. Im Jahr 1935 führte ein Zusammenschluss internationaler Wissenschaftler in Berlin zur Gründung des „Internationalen Verbandes für das wasserbauliche Versuchswesen“ (IAHR – damals: „International Association for Hydraulic Research“, heute: IAHR – International Association for Hydro-Environment Engineering and Research) (Kobus 1984). Stand der Beginn des 20. Jahrhundert ganz im Zeichen des Versuchswesens, so gehörte das Ende des 20. Jahrhunderts der numerischen Simulation immer komplexerer Strömungen. Die Navier-Stokes-Gleichungen bekamen mithilfe von Näherungs- und Diskretisierungsverfahren und immer größerer verfügbarer Rechenleistung praktische wasserbauliche Bedeutung. Heute ist es möglich, 3-dimensionale hydrodynamische Modelle mit Sedimenttransportmodellen zu koppeln und mehrere Kilometer eines Flussabschnitts auch an großen Flüssen wie etwa der Donau zu simulieren (Tritthart et al. 2019). Diese Entwicklungen im Bereich der Numerik gehen nicht spurlos am Modellversuchswesen vorbei. Wasserbauliche Fragestellungen, deren Beantwortung am Beginn des 20. Jahrhunderts dem Modellversuchswesen vorbehalten waren, können heute im Zusammenspiel mit numerischen Methoden rascher und günstiger gelöst werden. Dennoch ist klar, dass die numerischen Modelle viele Prozesse nur mit empirischen Formeln, die in Modellversuchen abgeleitet wurden, simulieren können. Gerade im Sedimenttransport zeigen z.B. Naturmessungen, dass viele Berechnungen nicht mit deren Ergebnissen übereinstimmen und z.B. der Bewegungsbeginn unter- oder überschätzt wird, die Transportmengen nicht korrekt sind und auch bei Hochwasser große Abweichungen bestehen. Darüber hinaus gibt es in weiterer Folge unzureichende mathematische Beschreibungen der Sohlformenentwicklung und Morphodynamik. Ebenso bestehen im Bereich der Ökohydraulik Limitationen im Prozessverständnis. Auch die Entwicklung von Baumaßnahmen zur Verbesserung des Sedimenthaushaltes bedingt vielfach den Einsatz von physikalischen Modellen. Das Modellversuchswesen

gewinnt daher in vielen Bereichen wie der Grundlagenforschung aber auch der anwendungsorientierten Forschung an Bedeutung. Es zeigt sich aber auch, dass viele Unzulänglichkeiten von in Modellversuchen abgeleiteten Formeln auf zu kleine Maßstäbe zurückzuführen sind und daher in diesem Bereich Verbesserungen wesentlich sind (Abschn. 4.3.).

Ziel des vorliegenden Beitrags ist, eine Neuorientierung des wasserbaulichen Versuchswesens aufzuzeigen. Es wird die Notwendigkeit großmaßstäblicher Versuchseinrichtungen erläutert, und es werden messtechnische Methoden am Stand der Forschung präsentiert und deren Anwendung an drei konkreten grundlagenorientierten Fallbeispielen dargestellt. Ein angewandter Modellversuch über die Auswirkungen baulicher Änderungen eines Flusskraftwerks auf die Sedimenttransportraten bei einer Stauraumentlandung ist in Sindelar et al. (2016) beschrieben.

2 Vor- und Nachteile des Modellversuchswesens

Die Merkmale einer physikalischen Modellierung (Modellversuch) gegenüber einer numerischen Modellierung sind in Abb. 1 dargestellt. Jede Modellierung, sei sie physikalisch oder numerisch, stellt immer eine Vereinfachung der zu untersuchenden Fragestellung in der Natur dar. Bei beiden Modellierungen ist man häufig mit unvollständigen oder fehlerhaften Naturdaten konfrontiert. Beim Skalieren eines Flussabschnitts in ein verkleinertes physikalisches Modell entstehen systematische Fehler, die zwar bekannt sind, deren Auswirkungen jedoch sehr schwer zu quantifizieren sind (Abschn. 4.4.). Im Unterschied dazu wird das numerische Modell in aller Regel nicht verkleinert, sondern im Naturmaßstab gerechnet. Bei der numerischen Simulation ist man jedoch darauf angewiesen, dass die zugrunde liegenden Formeln korrekt sind. Für die theoretisch hergeleiteten Navier-Stokes-Gleichungen ist das mit hoher Wahrscheinlichkeit der Fall. Da bei flussbaulichen Fragestellungen jedoch häufig die sogenannten Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen gelöst werden, die mittlere Geschwindigkeiten liefern, ist die dadurch notwendige Modellierung der Turbulenz potenziell fehlerbehaftet. Noch komplexer wird es, wenn der Sedimenttransport simuliert werden

soll. Hier muss auf empirische Formeln zurückgegriffen werden, die zum Großteil auf dem Konzept einer kritischen Schubspannung basieren, demzufolge Sedimenttransport einsetzt, wenn eine kritische Schubspannung erreicht oder überschritten wird (Shields 1936). Diese Sedimenttransportformeln werden in der Praxis verwendet, obwohl zahlreiche Forschungsarbeiten belegen, dass die dimensionslose kritische Schubspannung in natürlichen Flüssen um Größenordnungen variieren kann (Buffington und Montgomery 1997; Liedermann et al. 2018). Ein großer Vorteil der physikalischen Modellierung ist, dass die Strömung und die Sedimenttransportprozesse, die sich im physikalischen Modell zeigen, real vorhanden sind und nicht durch theoretisch oder empirisch unzureichende Formeln verzerrt werden. Dieser Vorteil ist durch die grüne Umrandung des Blockes „verkleinertes Modell“ in Abb. 1 visualisiert. Allerdings fehlt zum endgültigen Ergebnis eines Modellversuchs noch die „hohe Kunst“, die Ergebnisse des verkleinerten Modells auf den Naturmaßstab hochzuskalieren. Neben den bekannten Formeln, wie dies zu geschehen hat, ist bei diesem Vorgang auch viel Interpretation vonnöten: Speziell zu den Skalierungsfehlern gibt es kaum Forschungsarbeiten. Bei der Interpretation des Ergebnisses einer numerischen Simulation spielen anstatt der Skalierungsfehler die quantitativen Auswirkungen potenzieller Fehler in den zugrunde liegenden Formeln sowie die gewählte räumliche und zeitliche Auflösung eine entscheidende Rolle.

Im physikalischen Modell können Geschwindigkeiten punktuell (bspw. Messflügel, Acoustic Doppler Velocimetry-Sonde, Laser Doppler Velocimetry-Sonde), in einem Linienprofil (ADV Profiler) oder flächig (Particle Image Velocimetry) gemessen werden. Die Geschwindigkeiten können in einer (bspw. Messflügel), zwei (bspw. LDV) oder drei (bspw. ADV) Komponenten gemessen werden. Neben der räumlichen Auflösung spielt auch die zeitliche Auflösung der Messwerte eine große Rolle. Dies gilt vor allem, wenn aus den Geschwindigkeitsmessungen Turbulenzparameter berechnet werden sollen. ADV-Sonden schaffen Datenraten bis zu 200 Hz, LDV-Sonden je nach Strömungsgeschwindigkeit und in der Strömung verfügbaren Partikeln in Wasseranwendungen typischerweise bis zu 1000 Hz. Klassische PIV-Messungen sind auf-

Abb. 1 Konzeptionelle Unterschiede zwischen wasserbaulichem Modellversuch und numerischem Modell

grund der zum Einsatz kommenden Puls laser und Kameras mit 15 Hz limitiert, es gibt jedoch auch Highspeed-PIV-Systeme mit Lasern und Hochgeschwindigkeitskameras, die Datenraten von mehreren kHz zulassen. Die laser-optischen Messverfahren LDV und PIV zählen zu den berührungslosen, nicht-invasiven Messverfahren, bei denen zum Messen der Geschwindigkeit keine Sonde in die Strömung eingetaucht werden muss, es reicht ein optischer Zugang für den Laserstrahl und für die Kameras.

Wanddrücke können mithilfe von Drucksensoren (bspw. Messharfe, piezoresistiv, keramisch-kapazitiv) gemessen werden. Innerhalb einer Strömung können Drücke punktuell etwa mit einer Prandtl-Sonde gemessen werden. Es gibt weder flächige noch berührungslose Druckmessverfahren. Ein Vorteil der numerischen Modellierung

liegt darin, dass im gesamten Rechengebiet Geschwindigkeiten und Drücke in der gewählten räumlichen und zeitlichen Auflösung der Simulation vorliegen.

3 Neue messmethodische Entwicklungen

3.1 Die Weiterentwicklung von PIV und stereo-PIV zu tomo-PIV und tomo-PTV

Bei der seit den 1980er-Jahren eingesetzten PIV-Messmethode wird ein Schnitt in der Strömung mithilfe eines Lasers beleuchtet. Der Strömung werden Seedingpartikel zugegeben (bspw. Polyamid-Partikel mit Durchmessern zwischen 1 und 100 µm), die mit freiem Auge nicht sichtbar sind, im beleuchteten Laser-Lichtschnitt jedoch aufgrund der hohen sogenannten Lorenz-Mie-

Streuung klar erkennbar sind. Eine Kamera nimmt mit einer definierten Datenrate (bspw. 15 Hz) Bilder bzw. sogenannte Doppelbilder von der Strömung im Lichtschnitt auf. Aus der bekannten Zeitdifferenz zwischen den aufgenommenen zwei Doppelbild-Hälften können mit geeigneten Korrelationsverfahren 2D-Geschwindigkeiten in der Ebene des Lichtschnittes berechnet werden (Raffel et al. 2007). Eine Weiterentwicklung in den 1990er-Jahren stellt die sogenannte stereo-PIV-Methode dar, bei der der Lichtschnitt auf wenige Millimeter aufgefächert wird. Wird die Strömung dann mit mindestens zwei Kameras aus unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommen, kann man daraus 3D-Geschwindigkeiten in der Ebene des Lichtschnittes rekonstruieren (Arroyo und Greated 1991). Im Jahr 2006 wurde das volumetrische Verfahren „tomo-PIV“ entwickelt, bei dem – angelehnt an die aus der Medizin bekannten computertomografischen Verfahren – in einem Messvolumen 3D-Geschwindigkeiten rekonstruiert werden können (Elsinga et al. 2006). Dabei wird ein Volumen in einer mit Seeding-Partikeln versehenen Strömung mithilfe eines Lasers ausgeleuchtet. Mindestens drei Kameras nehmen synchron die Strömung aus verschiedenen Blickwinkeln auf. Pro Zeitschritt und Kamera erhält man Partikel-Bilder. In Abb. 2 ist der Aufbau des tomo-PIV-Systems dargestellt, das am Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung der Universität für Bodenkultur Wien zur Verfügung steht, bestehend aus vier Highspeed-CMOS-Kameras, einem Litron-Laser und einer Volumenoptik, die den Laserstrahl zu einem Volumen auffächert. Das System ist an einer Glasrinne aufgebaut, in

Abb. 2 Setup eines einseitig angeordneten Highspeed-tomo-PIV-Systems für Messungen in einer Glasrinne: **a** vier Highspeed-CMOS-Kameras, **b** Volumenoptik samt ausgeleuchtetem Volumen, **c** Seeding-Partikel und Einzelstein im ausgeleuchteten Volumen und **d** Rohbild einer Kamera zu einem Zeitpunkt mit Seeding-Partikeln und Einzelstein

Abb. 3 Momentanes Geschwindigkeitsfeld aus den tomo-PTV-Messungen während der Bewegung eines Einzelsteins; Konturplot der Geschwindigkeit v_x in Fließrichtung in (m/s)

der der Bewegungsbeginn eines Einzelsteins untersucht wird (Abschn. 4.1.). In Abb. 2c sind die Partikel im laserbeleuchteten Messvolumen sichtbar. Abb. 2d. ist ein Rohbild einer Kamera zu einem bestimmten Zeitpunkt. Zur Berechnung der 3D-Geschwindigkeiten im Messvolumen stehen zwei prinzipielle Methoden zur Verfügung: tomo-PIV und tomo-PTV (Particle Tracking Velocimetry). Beide Methoden sind am oben genannten Institut verfügbar. Bei der tomo-PIV-Methode wird aus den Kamera-Bildern ein Volumen rekonstruiert, das aus sogenannten Voxeln (= 3D-Pixel) besteht. Diese Rekonstruktion ist mathematisch betrachtet ein inverses Problem, das unterbestimmt und nicht direkt zu lösen ist. Sie basiert auf Methoden, die bereits längere Zeit in der Medizin zum Einsatz kommen (Elsinga et al. 2006). Nach der Volumenrekonstruktion wird pro Voxel und Zeitschritt mithilfe von Kreuzkorrelationsverfahren eine Geschwindigkeit in allen drei Raumrichtungen berechnet. In Abb. 3 ist beispielhaft das momentane Geschwindigkeitsfeld um einen Stein dargestellt, der gerade in Bewegung ist.

3.2 Die Particle Tracking Methode „Shake-the-Box“

Bei Particle Tracking Methoden (PTV) werden einzelne Partikelbahnen in der Strömung rekonstruiert. Der Vorteil der PTV-Methoden liegt darin, dass sie wesentlich schneller sind als die PIV-Methoden, was vor allem bei volumetrischen Auswertungen einen nicht zu unterschätzenden Zeitfaktor darstellt. So dauerte die Auswertung eines Steinexperiments (Abschn. 4.1.) mittels tomo-PIV rund vier Wochen, während die verwendete PTV-Methode lediglich 12h benötigte. Bisher galt als Nachteil der PTV-Methoden, dass die Partikeldichte im Wasser viel geringer sein muss als bei den PIV-Verfahren, wodurch auch die räumliche Auflösung der Geschwindigkeiten entsprechend niedriger ist. Partikeldichten werden in particles per pixel (ppp) angegeben. Durch die Entwicklung einer neuen PTV-Methode, dem sogenannten „Shake-the-box“-Algorithmus (STB), fällt die Einschränkung der geringen Partikeldichte bei gleichzeitiger Beibehaltung der Schnelligkeit weg. STB nutzt bekannte Partikelbahnen, um die Position des Partikels im nächsten Zeitschritt zu bestimmen. Dabei wird die bekannte

Partikelbahn durch eine Funktion beschrieben. Mittels Trendextrapolation kann die Position des Partikels für den nächsten Zeitschritt berechnet werden. Dadurch wird das Suchfenster für die nachfolgende Bildanpassungstechnik („shaking“ des Partikels im Raum) verkleinert, da die Lage des Partikels durch den Vorhersageprozess trotz potenzieller Fehlerbehaftung eingegrenzt wird. Die Nutzung der zeitlichen Informationen ermöglicht Partikeldichten größer als 0,1 ppp. Diese hohen Partikeldichten waren bisher nur bei tomo-PIV-Verfahren möglich (Schanz et al. 2016).

3.3 Druckfeld-Bestimmung aus experimentellen zeitaufgelösten 3D-Geschwindigkeiten

Die messtechnischen Fortschritte eröffnen neue Wege bei der Bestimmung des Druckfelds, die vor einigen Jahren nicht möglich waren (van Oudheusden 2013). Das Wissen über das momentane Druckfeld hat zwei Hauptvorteile: (i) Die Belastung auf einen Stein oder ein Bauwerk im Wasser kann bestimmt werden, und (ii) kohärente Strukturen können besser erkannt werden (Huhn et al. 2016). Die Rekonstruktion des Drucks ist ein sehr aktives Forschungsfeld. Basierend auf zeitaufgelösten experimentellen 3D-Geschwindigkeitsdaten kann das momentane Druckfeld unter Verwendung der instationären Navier-Stokes-Gleichungen für inkompressible Strömungen (1) ermittelt werden.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \Delta \mathbf{u} \quad (1)$$

Dabei bezeichnet $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$ die 3-dimensionale Geschwindigkeit in kartesischen Koordinaten; $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$ den Ortsvektor; ρ = die konstante Dichte des Fluids; ν = die konstante kinematische Viskosität; P = das Druckfeld; $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2}, \frac{\partial}{\partial x_3} \right)$; $\Delta = \nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2}, \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}, \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \right)$. Es gibt zwei Standardmethoden um aus Gl. (1) den Druck zu erhalten. Bei der ersten Methode wird der Druckgradient ∇P numerisch auf ausgewählten Pfaden (2) integriert. Bei der zweiten Methode wird die Poisson-Gleichung (3) numerisch gelöst. Die Poisson-Gleichung erhält man, wenn man die Divergenz „ $\nabla \cdot$ “ von Gl. (1) nimmt.

$$P(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) = P(\mathbf{x}) + \nabla P \Delta \mathbf{x} \quad (2)$$

Abb. 4 Versuchsschéma des tomo-PTV-Systems zum Bewegungsbeginn eines Einzelsteins auf einer glatten Sohle

$$\Delta P = \nabla^2 P = -\rho \nabla \cdot (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \quad (3)$$

Vor Kurzem wurde ein Ansatz der schnellen Fourier-Transformation (FFT) vorgeschlagen, bei dem das Druckgradientenfeld im Fourier-Raum integriert wird (Huhn et al. 2016).

Mit den genannten messtechnischen Entwicklungen ist es erstmals möglich, auch experimentell räumlich und zeitlich hochaufgelöste Geschwindigkeits- und Druckfelder zu erhalten. Das eröffnet im Wechselspiel mit numerischen Methoden wichtige neue Erkenntnisse in einem weiten Betätigungsfeld im Bereich der (angewandten) Grundlagenforschung zur Turbulenz, zum Sedimenttransport und allgemein zu Fluid-Struktur-Interaktionen (FSI).

4 Neue experimentelle Forschungsansätze zum Sedimenttransport

4.1 Zeitaufgelöste 3D-Messungen bei Bewegungsbeginn eines Einzelsteines

Der Bewegungsbeginn von Sedimentsohlen wird üblicherweise anhand einer kritischen Sohlschubspannung oder einer kritischen Geschwindigkeit ermittelt. Diese Parameter sind zeitlich und räumlich gemittelt und berücksichtigen daher keine Prozesse, bei denen zeitliche Schwankungen von Sohlschubspannung oder Geschwindigkeit den Bewegungsbeginn hervorrufen. Aktuelle Forschungsarbeiten belegen jedoch, dass die Turbulenz ebenso wie zeitlich und räumlich aufgelöste Parameter beim Bewegungsbeginn eine entscheidende Rolle spielen (Sindelar und Smart 2016; Smart und Habersack 2007). In physikalischen Modellversuchen wurde etwa der Bewegungsbeginn eines Einzelkorns basierend auf kritischen turbulenten Kräften und Impulsen (Diplas et al. 2008; Shih et al. 2017), kritischer

lokaler Geschwindigkeit (Schmeeckle et al. 2007) und Gitterturbulenz (Wan Mohtar und Munro 2013) untersucht. Neben der punktuellen Betrachtung zeitlicher Schwankungen werden im Zusammenhang mit dem Bewegungsbeginn immer häufiger auch sogenannte kohärente Strukturen untersucht. Kohärente Strukturen sind räumlich und zeitlich begrenzte zusammenhängende Gebiete in der Strömung, die für die Dauer ihres Bestehens keinen Austausch mit dem umgebenden Fluid haben. Kohärente Strukturen können bspw. über das sogenannte Q-Kriterium visualisiert und detektiert werden (Hunt et al. 1988).

In dem hier vorgestellten grundlagenorientierten Fallbeispiel war das Ziel, die räumlich und zeitlich auftretenden Geschwindigkeitsfelder bei Bewegungsbeginn eines Einzelsteins auf einer glatten Sohle mittels zeitaufgelöster tomo-PTV-Messungen zu ermitteln. Die Versuche wurden in einer 30 cm breiten, 10 m langen neigbaren Glasrinne am Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung der Universität für Bodenkultur Wien durchgeführt. Das Versuchsschéma ist in Abb. 4 dargestellt. An der rechtsseitigen Glasgerinnwand wurden vier Hochgeschwindigkeitskameras (Imager Pro HS 4M CMOS) positioniert. Ein Laser (LDY Double Cavity High Speed Laser, Litron) samt Volumenoptik leuchtete von oben ein Messvolumen von $L \times B \times H = 120 \times 60 \times 150$ mm aus. Der Strömung wurden Polyamid-Partikel mit einem Durchmesser von $50 \mu\text{m}$ zugegeben.

In der Mitte des Messvolumens wurde ein Stein mit einem Durchmesser von 30 mm positioniert. Der Referenzversuch wurde in einer bis auf den Stein unverbauten Rinne durchgeführt. Für die weiteren Versuche wurde 120 mm flussauf des Steins ein vertikaler Zylinder in der Gerinneachse positioniert.

Vier verschiedene Zylinderdurchmesser d_s wurden getestet. Bei allen Versuchen wurde bei einem konstanten Wasserspiegel von 150 mm der Durchfluss so lange gesteigert, bis der Bewegungsbeginn ausgelöst wurde. In Tab. 1 ist das Versuchsprogramm zusammengefasst.

Bei den Versuchen ohne Zylinder konnten in Übereinstimmung mit anderen jüngeren Forschungsarbeiten erstmals sogenannte „hairpin“-Wirbel bei Bewegungsbeginn visualisiert werden (Schobesberger et al. o.J., eingereicht). Mangels verfügbarer volumetrischer Messungen konnte in den bisherigen Forschungsarbeiten aus Punkt- und 2D-PIV-Messungen der Hairpin-Wirbel nur postuliert werden. Dies geschah über die sogenannte Quadrantanalyse und die turbulenten Geschwindigkeitsanteile ($u' = u - U$ und $v' = v - V$) an einem ausgewählten Punkt, mithilfe derer schnelles Fluid („sweeps“ und „outward interactions“) von langsamem Fluid („ejections“ und „inward interactions“) unterschieden werden kann. Die Abfolge von langsamem und anschließend schnellem Fluid lässt dann auf die Anwesenheit eines Hairpin-Wirbels schließen, der durch das langsame Fluid von der Sohle wegbewegt wird (auch bekannt als „burst“-Ereignisse) und anschließend vom schnellen Fluid quasi unterspült wird. Dwivedi et al. (2011) vermutete anhand von gegengleich rotierenden Wirbeln bei Sedimentbewegungsbeginn in 2D-Vektorfeldern (aus PIV-Messungen), dass dies ein weiterer Indikator für die Anwesenheit eines Hairpins sei. Weitere Versuche über raue Sohlen, die naturähnlichere Zustände simulieren, sind geplant.

Aus Tab. 1 ist ersichtlich, dass sich mit größerem Zylinder der Durchfluss verringert, der den Bewegungsbeginn auslöst. Die Ablösefrequenz der Strö-

Tab. 1 Versuchsprogramm zur Bewegung eines Einzelsteins

Set	d_s (mm)	Q (l/s)	Ablösefrequenz (Hz)	Bewegung
1	–	22,6	–	Ja
2	12	22,2	8,15	Ja
3	–	22,2	–	Nein
4	20	21,7	4,77	Nein
5	–	21,7	–	Nein
6	25	18,4	3,24	Ja
7	–	18,4	–	Nein
8	32	19,8	2,73	Ja
9	–	19,8	–	Nein

Abb. 5 Tornadoartige kohärente Struktur beim Zylinder Versuch (Set 6), visualisiert durch das Q-Kriterium

mung vom Zylinder reduziert sich und stimmt sehr gut mit den theoretisch berechneten Werten überein (Schoberberger et al. 2017). Eine Erklärung für den früheren Bewegungsbeginn bei den Zylinderversuchen können kohärente Strukturen – hervorgerufen durch die Ablösungen – sein. Die tomo-PTV-Versuche unterstützen diese Theorie. Mithilfe des Q-Kriteriums konnte bei den Zylinderversuchen eine tornadoartige kohärente Struktur entdeckt werden (Abb. 5).

4.2 Kopplung von Strömungsmessung und Sedimenttransport

Formeln für Sedimenttransportraten basieren häufig auf der Differenz von aktueller zu kritischer Sohlschubspan-

nung. Die Kenntnis der Sohlschubspannung ist also ein wesentlicher Parameter, um Sedimenttransportprozesse zu beschreiben bzw. vorhersagen zu können. Die Sohlschubspannung τ_0 kann aus einem mechanischen Ansatz ermittelt werden (4), bei dem ein als starr angenommener Wasserkörper auf einer rauen Sohle gleitet, wobei ρ , g , H und S die Dichte des Wassers, die Erdbeschleunigung, die Wassertiefe und das Sohlgefälle bezeichnen. Dieser Ansatz gilt unter der Annahme, dass die Gewässerbreite im Verhältnis zur Wassertiefe sehr groß ist, und dass Normalabfluss herrscht.

$$\tau_0 = \rho g H S \quad (4)$$

Nikora et al. (2013; 2001) ermitteln aus den räumlich und zeitlich gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen die Gesamtschubspannung τ als Summe aus einem viskosen, einem turbulenten und einem forminduzierten Anteil (5).

$$\tau = \tau_v + \tau_t + \tau_f \quad (5)$$

Liegen Messungen von zwei Geschwindigkeitskomponenten u und w in x - und z -Richtung (Hauptfließrichtung, vertikale Richtung) vor, so ergibt sich für die Gesamtschubspannung τ_{uw} (6).

$$\tau_{uw} = \rho A(z) \left(\nu \left\langle \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right\rangle (z) - \left\langle u' w' \right\rangle (z) - \left\langle \bar{u} \bar{w} \right\rangle (z) \right) \quad (6)$$

Dabei bezeichnen $\bar{u}$, $\bar{w}$ zeitliche gemittelte Geschwindigkeitskomponenten, u' , w' instantane Geschwindigkeitsfluktuationen, $\bar{u}$, und $\bar{w}$ räumliche Geschwindigkeitsabweichungen und $\langle \bar{u} \rangle$ und $\langle \bar{w} \rangle$ doppelt gemittelte Geschwindigkeiten. In dem hier vorgestellten Fallbeispiel war das Ziel, die Gesamtschubspannung τ_{uw} und ihre jeweiligen Anteile über eine raue Sohle mithilfe von PIV-Messungen zu ermitteln. Dabei wurden die Versuche mit und ohne Zugabe von Sedimenten durchgeführt. Es sollte eine Aussage getroffen werden, ob sich der Sohlwiderstand bei beweglicher Sohle erhöht oder verringert (Lichtneger et al. 2016).

Die Versuche wurden in einer 30 cm breiten, 10 m langen Glasrinne mit einer Neigung $S=1,5\%$ am Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung der Universität für Bodenkultur Wien durchgeführt. Es wurde eine raue Sohle ($d_m=37,5$ mm) eingebaut und bis zu den Steinspitzen mit Sand bedeckt. Danach wurde diese Sohle mit $Q=20$ l/s so lange beaufschlagt, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellte und kein Sand mehr transportiert wurde. Diese Sohle wurde anschließend

Abb. 6 Versuchsaufbau in der Glasrinne zur Messung der Gesamtschubspannung mittels PIV

Abb. 7 Ausschnitt der rauhen Sohle, an dem die PIV-Messungen durchgeführt wurden

mit Zement fixiert, um eine nicht-poröse Sohle zu erhalten. In Abb. 6 ist der Versuchsaufbau in der Glasrinne dargestellt. Das „betrachtete Gebiet“ ist jene Stelle, an der die laser-optischen Messungen gemacht wurden.

Die Sohle wurde mittels Fächerlaser aufgenommen und digitalisiert (Abb. 7). An der Wasseroberfläche wurde eine Plexiglasplatte in strömungsgünstiger Form positioniert, um Refraktionen und Schwankungen des Laserschnitts durch Wellenbewegungen an der Wasseroberfläche zu verhindern. Zum Einsatz kam eine sCMOS-Kamera Zyla mit einer Auflösung von 2560×1920 Pixel, ein Quantel Evergreen Doppelpuls laser bis 2×200 mJ mit einer Lichtwellenlänge von 532 nm. Als Seedings wurden Polyamid-Partikel von $50 \mu\text{m}$ verwendet. Die Aufnahmedauer pro Experiment betrug 120 s, womit bei einer Doppelbildrate von 15 Hz jeweils 1800 2D-Geschwindigkeitsfelder aufgenommen und ausgewertet werden konnten.

Die Versuchsbedingungen sind in Tab. 2 zusammengefasst. Es wurde ein konstanter Durchfluss $Q = 20 \text{ l/s}$ und eine konstante Wassertiefe $H = 77 \text{ mm}$ eingestellt. Der Versuch ohne bewegliche Sohle wird mit „PIV0“ bezeichnet. Beim Versuch mit beweglicher Sohle – „PIV3“ – wurden 3 mm große Sandkörner kontinuierlich zugegeben. Die Sedimenttransportrate betrug $q_s = 13 \text{ g/sm}$.

Tab. 2 Versuchsbedingungen und errechnete, extrapolierte Sohlschubspannung τ_0

Versuch	Q (l/s)	H (mm)	q_s (g/sm)	τ_0 (N/m ²)
PIV0	20	77	0	17,23
PIV3	20	77	13	16,03

In Abb. 8 sind das normalisierte Schubspannungsprofil τ_{uw}/τ_0 und seine viskosen, turbulenten und forminduzierten Anteile für die Versuche PIV0 und PIV3 dargestellt. Die Sohlschubspannung τ_0 wird durch lineare Extrapolation von τ_{uw} an die Sohle ermittelt.

Der viskose Anteil ist erwartungsgemäß vernachlässigbar klein. Der forminduzierte Anteil ist ebenfalls gering, sein Maximum korreliert bei $z/H = 0,08$ mit dem lokalen Minimum der turbu-

lenten Schubspannung. Der turbulente (oder Reynolds'sche) Anteil der Schubspannung dominiert. Ein Vergleich zwischen den Versuchen mit und ohne Sedimentzugabe zeigt, dass im Bereich $0,08 < z/H < 0,6$ die Schubspannungen voneinander abweichen. Bei PIV3 ist die gesamte Schubspannung zwischen $0,12 < z/H < 0,4$ um etwa 10% kleiner als bei PIV0. Die Zugabe von Sediment verursacht eine Verringerung der lokalen Schubspannungen um ca. 5 bis 7% bei gleichzeitiger Erhöhung der Fließgeschwindigkeiten um ca. 5%. Beides deutet drauf hin, dass das bewegte Sediment zu einer schnelleren Dissipation der Sohlerturbulenz beiträgt und somit den Fließwiderstand der Sohle verringert. Weitere Versuche im 1:1-Maßstab sind geplant, um dieses Ergebnis abzusichern.

4.3 Großmaßstäbliche Versuche zum Sedimenttransport

Der Nachteil von physikalischen Modellen besteht darin, dass es sich in der Regel um skalierte Modelle handelt, da es meist räumliche Einschränkungen und Limitierungen hinsichtlich des

Abb. 8 Normalisiertes Schubspannungsprofil τ_{uw}/τ_0 für PIV0 und PIV3

Abb. 9 Grundriss des BOKU-Forschungsgerinnes, das die Donau mit dem Donaukanal verbindet, Fließrichtung von links nach rechts. Verfügbare Messtechnik: **a** Drucksonden zur Wasserspiegelmessung, **b** Fotogrammetrie-Kameras, **c** 3 x Sidelooking-Doppler-Sonden, **d** Durchflusssensoren, **e** 2 Trübesonden, **f** RFID-Tracer-Detektion

maximal verfügbaren Durchflusses gibt. Das Skalieren eines realen Problems auf ein kleineres physikalisches Modell ist inhärent mit Fehlern verbunden. So kann etwa nicht gleichzeitig die Froude- und die Reynoldsähnlichkeit in einem verkleinerten Modell hergestellt werden, wenn sowohl in der Natur als auch im verkleinerten Modell das Medium Wasser verwendet wird. Bei Freispiegel-Modellen hat dies zur Konsequenz, dass die Reynoldszahlen im verkleinerten Modell nicht mit jenen in der Natur übereinstimmen. Um diese Probleme zu umgehen, ist international ein Trend zu beobachten, experimentelle Forschungseinrichtungen zu errichten, die einen sehr großen Maßstab bis hin zum Naturmaßstab er-

möglichen (IAHR-hydraulink 2016). Der Universität für Bodenkultur Wien steht mit dem BOKU-Forschungsgerinne eine einzigartige Einrichtung zur Verfügung, um Experimente im Großmaßstab oder 1:1-Naturmaßstab unter kontrollierten Bedingungen durchzuführen (Abb. 9 und 10). Der Forschungskanal hat einen rechteckigen Querschnitt und ist 5 m breit und 120 m lang. Er verbindet die Donau mit dem Donaukanal. Unter Ausnutzung der Wasserspiegeldifferenz zwischen Donau und Donaukanal (durchschnittlich 3 m) steht final ein Durchfluss von bis zu 10 m³/s ohne Pumpen zur Verfügung. Der Forschungskanal verfügt über eine 30 m lange Teststrecke. Der Abfluss und der Wasserstand können durch zwei Schüt-

zenbauwerke vor und nach der Teststrecke (in Abb. 9 mit „RS“ und „SS“ gekennzeichnet) eingestellt/gesteuert werden.

4.4 Abschätzung der Skalierungsfehler

In einem Froude-ähnlichen Modell sind die Reynoldszahlen im verkleinerten Modell um den Faktor $L^{3/2}$ kleiner als in der Natur, dabei bezeichnet L den Längenmaßstab. Alle Reynoldszahl-abhängigen Prozesse werden daher im verkleinerten Modell nicht richtig wiedergegeben. Die Reynoldszahl spielt bspw. beim Widerstandsverhalten umströmter Körper eine große Rolle. Es gibt kaum Forschungsarbeiten, die sich mit der Quantifizierung der Skalierungsfehler beschäftigen. In dem hier präsentierten Fallbeispiel wurde eine Modellfamilie in drei Maßstäben untersucht. Ziel war es, mögliche Unterschiede bei Strömungen über Kiessohlen in den einzelnen Skalen, vor allem hinsichtlich der zeitlich aufgelösten Turbulenzparameter, zu erfassen und zu quantifizieren. Das BOKU-Forschungsgerinne ermöglichte die Durchführung von 1:1-Versuchen. Im 5 m breiten Forschungsgerinne wurde eine Kiessohle mit Sedimenten aufgebaut, die den groben Fraktionen der Donau flussab von Wien entsprechen. In drei Querprofilen und einem Längsprofil wurden in insgesamt 33 Messlotrechten mit jeweils 10 bis 15 Punkten die 3D-Ge-

Abb. 10 Längsschnitt des BOKU-Forschungsgerinnes, Fließrichtung von links nach rechts

Abb. 11 1:1-Naturversuch: Forschungsgerinne mit Messbrücke für die Sonden (a), LDV-Sonde an der Kiessohle (b) und LDV-Sonde während der Messung eines Punktes in einem Hohlraum der Sohle (c)

Tab. 3 Versuchsparameter der Modellfamilie über Kiessohlen

Parameter	M = 1:1	M = 1:5	M = 1:16,6
Länge (m)	19	3,8	1,14
Breite (m)	5	1	0,3
Höhe (m)	1,1	0,22	0,066
Durchfluss (m ³ /s)	4,5	0,08	0,004
Froude-Zahl (–)	0,25	0,25	0,25
Reynolds-Zahl (–)	$9,18 \times 10^5$	$8,2 \times 10^4$	$1,35 \times 10^4$

schwindigkeiten mit der ADV-Sonde Vector gemessen, die auch die Auswertung von Turbulenzparametern erlaubt. Als Vergleich wurden zusätzlich LDV-Messungen durchgeführt. Dies stellte eine große Herausforderung dar, da die LDV-Messtechnik ein optisches Verfahren ist, das für trübe Strömungen nicht ohne zusätzliche Vorkehrungen geeignet ist. Die LDV-Messungen konnten mit höheren Datenraten als die ADV-Messungen durchgeführt werden. Zusätzlich erlaubt diese berührungslose Technik das Messen von Punkten zwischen zwei Steinen, wodurch es auch an unregelmäßigen Sohlen möglich ist, sohlennahe Messungen durchzuführen (Abb. 11).

Die weiteren Versuche der Modellfamilie wurden in den Modellmaßstäben 1:5 und 1:16,6 im Wasserbaulabor der Universität für Bodenkultur Wien durchgeführt. Die Wahl der Modellmaßstäbe ergab sich durch die Verfügbarkeit von zwei Glasrinnen der Breiten 1 m und 0,3 m. So konnte im verkleinerten Modell auch die Gerinnebreite des Naturversuchs im Forschungsgerinne exakt skaliert werden, wodurch potenzielle Fehler aufgrund von unterschiedlichen Wandeinflüssen wegfallen. In Tab. 3 sind die Versuchsparameter zusammengestellt. Daraus ist ersichtlich, dass sich die Reynoldszahl im Naturmaßstab vom kleinsten Maßstab fast um den Faktor 100 unterscheidet.

Die Auswertungen sind aktuell im Gange und sollen einen Beitrag zur Quantifizierung von Skalierungsfehlern auf Basis eines Naturversuchs unter kontrollierten Bedingungen liefern.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Methodenpalette für wasserbauliche Fragestellungen hat in den vergan-

gen Jahrzehnten durch die rasante Entwicklung der Computertechnologie samt entsprechenden numerischen Methoden eine große Erweiterung erfahren. Die numerischen Methoden sind einerseits komplementär zum wasserbaulichen Modellversuchswesen, andererseits kann die Numerik heute Aufgaben übernehmen, die aufgrund ihrer Komplexität früher dem Modellversuchswesen vorbehalten waren. Gleichzeitig wird durch Abweichungen zwischen Naturmessungen und Ergebnissen von numerischen Simulationen klar, dass viele empirische Sedimenttransportformeln etc. möglicherweise aufgrund zu kleiner Maßstäbe verbessert werden müssen und auch viele Prozesse, z.B. Interaktion zwischen Biotik und Abiotik, nicht ausreichend mathematisch beschrieben sind.

Zusätzlich zu ihrer wissenschaftlichen Bedeutung übernehmen physikalische Modelle die wichtige Rolle, reale Strömungen und Transportprozesse (Sediment, Plastik, Schadstoffe, Schwemmholz etc.) in der Praxis zu optimieren, besonders dort, wo numerische Methoden nach wie vor an ihre Grenzen stoßen, aber auch die Ergebnisse sichtbar und erlebbar zu machen. Dies ist für Behörden, PlanerInnen und Stakeholder, aber auch für Studierende von großem Wert. Das Modellversuchswesen wird weiterhin eine unverzichtbare Rolle spielen, um experimentelle Daten zur Kalibrierung und Validierung numerischer Modelle zu liefern. Darüber hinaus besitzt das Modellversuchswesen ein Alleinstellungsmerkmal durch die Tatsache, dass reale Prozesse untersucht und gemessen werden können, ohne dass die zugrunde liegenden physikalischen Prozesse bekannt sein müssen. Die Kombination aus neuen zeitaufgelösten berührungslosen, volumetrischen Messverfahren zur Messung von 3D-Geschwindigkeiten und zur Bestimmung von Druckfeldern mit Modellversuchen in sehr großen Maßstäben bis hin zum Maßstab 1:1 eröffnet ein weites Betätigungsfeld. Dem Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung stehen sowohl die neuen Messsysteme zur Verfügung, als auch das BOKU-Forschungsgerinne, sowie in naher Zukunft das neue BOKU-Wasserbaulabor zur Durchführung von Modellversuchen bis hin zum Maßstab 1:1. Die neuen Möglichkeiten haben

das Potenzial, Sedimenttransportprozesse in einer bisher nicht verfügbaren Detailschärfe und Naturnähe zu untersuchen und auf eine neue wissenschaftliche Basis zu stellen. In weiterer Folge können daraus effizientere Sedimentmanagement-Strategien zur Stauramentlandung (Sindelar et al. 2016), zur Reduktion von Sohleintiefungen (Sindelar et al. 2019) und zur Verbesserung des Sedimentkontinuums durch Optimierung von Bauwerken bis hin zur damit verbundenen Lösung ökologischer Problemstellungen entwickelt werden (vgl. Hauer et al. 2018).

Danksagung Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung. Wir bedanken uns bei der EQ-BOKU VIBT GmbH für die Finanzierung der laser-optischen Messgeräte. Die präsentierten Forschungsergebnisse wurden von der Europäischen Union kofinanziert (SEDECO (Interreg V-A Österreich-Tschechische Republik), DREAM SK-AT (Interreg V-A Slowakei – Österreich), SEDDON II (Interreg V-A Österreich – Ungarn)).

Funding Open access funding provided by University of Natural Resources and Life Sciences Vienna (BOKU).

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.

Literatur

- Arroyo, M. P., & Greated, C. A. (1991): Stereoscopic particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 2(12), 1181–1186. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/2/12/012>
- Buffington, J. M., & Montgomery, D. R. (1997): A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers. *Water Resources Research*, 33(8), 1993–2029. <https://doi.org/10.1029/96WR03190>.
- Dwivedi, A., Melville, B. W., Shamseldin, A. Y., & Guha, T. K. (2011): Flow structures and hydrodynamic force during sediment entrainment. *Water Resources Research*, 47(1). <https://doi.org/10.1029/2010WR009089>.
- Diplas, P., Dancy, C. L., Celik, A. O., Valyrakis, M., Greer, K., & Akar, T. (2008): The Role of Impulse on the Initiation of Particle Movement Under Turbulent Flow Conditions. *Science*, 322(5902), 717–720.
- Elsinga, G. E., Scarano, F., Wieneke, B., & van Oudheusden, B. W. (2006): Tomographic particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 41(6), 933–947. <https://doi.org/10.1007/s00348-006-0212-z>
- IAHR-hydraulink. (2016): Issue 1. (A. N. Findikakis, Ed.).
- Hauer, C., Wagner, B., Aigner, J., Holzapfel, P., Flödl, P., Liedermann, M., ... Habersack, H. (2018): State of the art, shortcomings and future challenges for a sustainable sediment management in hydropower: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98, 40–55. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.031>
- Huhn, F., Schanz, D., Gesemann, S., & Schröder, A. (2016): FFT integration of instantaneous 3D pressure gradient fields measured by Lagrangian particle tracking in turbulent flows. *Experiments in Fluids*, 57(9), 151. <https://doi.org/10.1007/s00348-016-2236-3>
- Hunt, J. C. R., Wray, A. A., & Moin, P. (1988): Eddies, Streams, and Convergence Zones in Turbulent Flows. In *Center for Turbulence Research, Proceeding8 of the Summer Program 1988* (pp. 193–208).
- Kobus, H. (1984): *Wasserbauliches Versuchswesen*. (D. V. für W. und K. e.V. (DVWK), Ed.) (Vol. 39). Hamburg und Berlin: Paul Parey.
- Lichtneger, P., Sindelar, C., Habersack, H., Prager, E., & Kitzhofer, J. (2016): Experimental investigation on local shear stress and turbulence intensity over a rough bed with and without sediment using temporally and spatially resolved Laser Doppler Anemometry and Particle Image Velocimetry. In *Conf. Proc. of the International Symposium on River Sedimentation, September 19–22, 2016 in Stuttgart*.
- Liedermann, M., Gmeiner, P., Kreisler, A., Tritthart, M., & Habersack, H. (2018): Insights into bedload transport processes of a large regulated gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(2), 514–523. <https://doi.org/10.1002/esp.4253>
- Wan Mohtar, W. H. M., & Munro, R. J. (2013): Threshold criteria for incipient sediment motion on an inclined bedform in the presence of oscillating-grid turbulence. *Physics of Fluids*, 25(1), 015103. <https://doi.org/10.1063/1.4774341>
- Nikora, V., Ballio, F., Coleman, S., & Pokrajac, D. (2013): Spatially Averaged Flows over Mobile Rough Beds: Definitions, Averaging Theorems, and Conservation Equations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(8), 803–811. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000738](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000738)
- Nikora, V., Goring, D., McEwan, I., & Griffiths, G. (2001): Spatially Averaged Open-Channel Flow over Rough Bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(2), 123–133. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:2\(123\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:2(123))
- van Oudheusden, B. W. (2013): PIV-based pressure measurement. *Measurement Science and Technology*, 24(3), 032001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/3/032001>
- Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S. T., & Kompenhans, J. (2007): *Particle Image Velocimetry* (2nd ed.). Springer-Verlag Berlin/Heidelberg.
- Reynolds, O. (1883): An Experimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinuous, and of the Law of Resistance in Parallel Channels. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 174, 953–982.
- Schanz, D., Gesemann, S., & Schröder, A. (2016): Shake-The-Box: Lagrangian particle tracking at high particle image densities. *Experiments in Fluids*, 57(5), 70. <https://doi.org/10.1007/s00348-016-2157-1>
- Schmeeckle, M. W., Nelson, J. M., & Shreve, R. L. (2007): Forces on stationary particles in near-bed turbulent flows. *Journal of Geophysical Research*, 112(F2), F02003. <https://doi.org/10.1029/2006JF000536>
- Schobesberger, J., Lichtneger, P., Hauer, C., Habersack, H., & Sindelar, C. (n.d.): Three-dimensional coherent flow structures during incipient stone motion. *J. Hydr. Engrg (eingereicht)*.
- Schobesberger, J., Lichtneger, P., Sindelar, C., & Habersack, H. (2017): Anwendung von 2D-PIV und Tomo-PTV zur Betrachtung des Sedimenttransportes und des Bewegungsbeginns einzelner Steine. In B. Ruck, A. Gromke, A. Leder, & D. Doppeide (Eds.), *Fachtagung „Experimentelle Strömungsmechanik“, Karlsruhe, Germany, SEP 5–7, 2017*. Karlsruhe.
- Shields, A. (1936): Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Mitteilung Der Preussischen Versuchsanstalt Für Wasserbau Und Schiffbau*.
- Shih, W., Diplas, P., Celik, A. O., & Dancy, C. (2017): Accounting for the role of turbulent flow on particle dislodgement via a coupled quadrant analysis of velocity and pressure sequences. *Advances in Water Resources*, 101, 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.01.005>
- Sindelar, C., & Smart, G. (2016): Transition flow in step-pool systems: Pressure distributions and drag forces. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001165](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001165)
- Sindelar, C., Schobesberger, J., & Habersack, H. (2016): Effects of weir height and reservoir widening on sediment continuity at run-of-river hydropower plants in gravel bed rivers. *Geomorphology*. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.007>
- Sindelar, C., Tritthart, M., Habersack, H., Pfelemer, M., Sattler, S., & Hengli, M. (2019): Sohlenstabilisierung bei Aufweitungen und geschiebefazitären Flüssen. *WASSERWIRTSCHAFT*, 109(1), 12–18. <https://doi.org/10.1007/s35147-018-0280-z>
- Smart, G. M., & Habersack, H. M. (2007): Pressure fluctuations and gravel entrainment in rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 45(5), 661–673.
- Tritthart, M., Glock, K., Glas, M., Yücesan, S., Liedermann, M., Gmeiner, P., ... Habersack, H. (2019): Erfahrungen in der numerischen Sedimenttransportmodellierung auf unterschiedlichen Skalen – von RANS bis LES. *Österr. Wasser-Und Abfallwirtschaft*. <https://doi.org/10.1007/s00506-018-0550-0>.