

Anwendung von 2D-PIV und Tomo-PTV zur Betrachtung des Sedi- menttransportes und des Bewegungsbeginns einzelner Steine

2D-PIV and TOMO-PTV applications for investigating bed load transport and the incipient motion of a single stone

Johannes Schobesberger, Petr Lichtneger, Christine Sindelar, Helmut Habersack
Institut für Hydrologie, Wasserwirtschaft und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur,
Muthgasse 18, 1190 Wien

Sedimenttransport, Sohlschubspannung, Doppelmittelung, 2D-PIV, 4D-PTV, Shake the Box
Bed load transport, shear stress, double averaging, 2D-PIV, 4D-PTV, Shake the Box

1. Zusammenfassung

Ziel des Beitrages ist es durch Anwendung verschiedener PIV Systeme den Sedimenttransport und den Bewegungsbeginn eines einzelnen Steines zu untersuchen. Dazu wurden 2D-PIV Versuche zur Untersuchung der Strömung mit und ohne Zugabe von Sedimenten durchgeführt. Die 2D PIV Versuche erlauben den Vergleich über das Strömungsverhalten - genauer über die Schubspannung - eines mit und ohne Sediment belasteten Abflusses. Es konnte eine geringere Schubspannung bei herrschendem Sedimenttransport als bei vergleichbaren Versuchen ohne Sedimenttransport festgestellt werden. Der Bewegungsbeginn eines einzelnen Steines, hervorgerufen durch einen zylindrischen Störkörper wurde mittels TOMO PTV untersucht. Die Versuche zeigten, dass aufgrund der Störung, trotz gleicher Eingangsgrößen, der betrachtete Stein bei geringeren mittleren Geschwindigkeiten in Bewegung versetzt wird.

2. Einleitung

Der Bewegungsbeginn von Sedimenten in Flüssen wird klassischerweise über die Sohlschubspannung definiert. Wird ein kritischer Wert überschritten, setzen sich die Sedimente an der Flusssohle in Bewegung. Diese kritische Sohlschubspannung wurde semi-empirisch ermittelt und im Shields-Diagramm zusammengefasst (Shields, 1936). Demnach hängt der Bewegungsbeginn von der Sohlneigung, dem hydraulischen Radius (der Wassertiefe), der Dichte und Zähigkeit des Wassers, sowie vom Korndurchmesser und der Dichte des Sediments ab. Alle unabhängigen Variablen sind in diesem Ansatz zeitlich gemittelt und auf einen Fließquerschnitt bezogen. Die Forschungsarbeiten der jüngeren Vergangenheit belegen jedoch, dass die Turbulenz sowie zeitlich und räumlich aufgelöste Parameter für den Bewegungsbeginn eine entscheidende Rolle spielen (Sindelar & Smart, 2016). In physikalischen Modellversuchen wurde etwa der Bewegungsbeginn eines Einzelkorn basierend auf kritischen turbulenten Kräften und Impulsen (Celik et al., 2013), kritischer lokaler Anströmgeschwindigkeit (Schmeeckle et al., 2007) und Gitterturbulenz (Wan Mohtar & Munro, 2013) untersucht. In diesem Beitrag werden räumlich und zeitlich aufgelöste PIV-Messungen herangezogen, um den Sedimenttransport und den Bewegungsbeginn einzelner Steine zu charakterisieren.

3. PIV Versuche zur turbulenten Schubspannung

Die Sohlschubspannung τ_0 wird aus der Impulsgleichung abgeleitet: $\tau_0 = \rho gHS$. Dieser Wert stellt einen Querschnittsparameter dar. Für die Ermittlung der Sohlschubspannung wird oft die Methode der turbulenten Reynolds'schen Schubspannungen angewendet. Das turbulente Schubspannungsprofil über einer glatten Sohle, steigt beginnend von der Wasseroberfläche zur Sohle linear an (Bereich der logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung) und entspricht in der Verlängerung bis zur Sohle der Sohlschubspannung τ_0 . Die Reynolds'sche Schubspannung erreicht das Maximum an der inneren Grenzschicht wobei an der Sohle die molekulare Schubspannung (viskose Unterschicht) überwiegt. Bei rauen Oberflächen entsteht ein signifikanter Übergangsbereich zwischen linearer und logarithmischer Geschwindigkeitsverteilung, an der die Reynolds'sche Schubspannung abnimmt und diese gleichzeitig, in Abhängigkeit der lokalen Sohlrauigkeit, variiert. Nikora et al. (2001, 2013) schlägt ein sog. Double-Mittelung-Konzept vor, welches auf der zeitlichen (Reynolds'schen) und Flächenmittelung basiert. Nach diesem Konzept ist die gesamte Schubspannung Gleichung (1) ein Summenwert aus einem (i) viskosen, τ_v , (ii) turbulenten, τ_t , und (iii) form-induzierten, τ_f , Anteil.

$$\tau = \tau_v + \tau_t + \tau_f . \quad (1)$$

3.1 Methodik

Die raue Sohle ($d_m=37,5\text{mm}$) wurde in einer geraden hydraulischen Rinne (Breite 30cm, Neigung $S=1,5\%$) mit internem Wasserkreislauf integriert. Danach wurde die Sohle mit einer Sandschicht ($d_m=1\text{mm}$) bedeckt und anschließend bei einem Durchfluss von $Q=20\text{l/s}$ bis zum Erreichen eines stabilen Zustandes „ausgespült“. Die so entstandene Sohle wurde mit Zement versiegelt, um eine nicht poröse und stabile Sohle zu schaffen. Abbildung 1 stellt den Längenschnitt des Versuchsaufbaus dar.

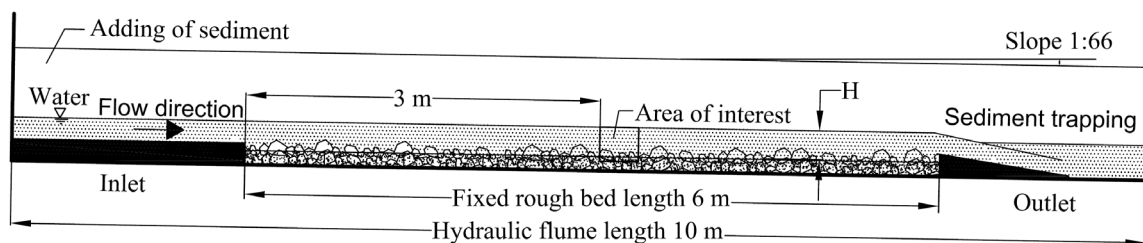


Abb. 1: Längenschnitt durch die hydraulische Rinne mit Einbau einer rauen Sohle

Die Geometrie der Sohle wurde mittels Fächer-Laserscann vermessen und digitalisiert. Abbildung 2 zeigt die kumulative Verteilung der gemessenen Z-Koordinaten (normal zur Rinnensohle). Anhand des Diagramms ist ersichtlich, dass die Sohlrauigkeit global zwischen 45–80mm, in dem Messabschnitt (area of interest) zwischen 48–66mm und in der PIV-Messlinie (Achsenlinie im Messabschnitt) zwischen 52–62mm variiert. Ein konstanter Durchfluss von 20l/s mit gleichförmiger Wassertiefe $H=77\text{mm}$ wurde eingestellt. Daraus resultiert ein Breiten- zu Höhenverhältnis von ungefähr 4. Basierend darauf, wurde die mittlere Querschnittsgeschwindigkeit $U=Q/(BH)=0.87\text{ m/s}$, die Reynolds- und Froudezahlen $Re=UH/\nu=67\ 000$ und $Fr=U/\sqrt{gH}=0,996$ berechnet. Für die Bestimmung der Parameter wurde die Wassertiefe statt dem hydraulischen Radius angewendet, da die Strömung in der Achse als symmetrisch angenommen und die Einflüsse der Wände vernachlässigbar waren. Das Experiment wurde mit (PIV3) und ohne (PIV0) Zugabe von transportierten Sediment ($d_s = 3\text{ mm}$) durchgeführt, wobei die Zugabe des Sediments ($Q_s=3.9\text{g/s}$, bzw. $q_s=13\text{g/s/m}$) kontinuierlich erfolgte. Mehrere Details zum Experiment können auch in Lichtneger et al. (2016) nachgelesen werden.

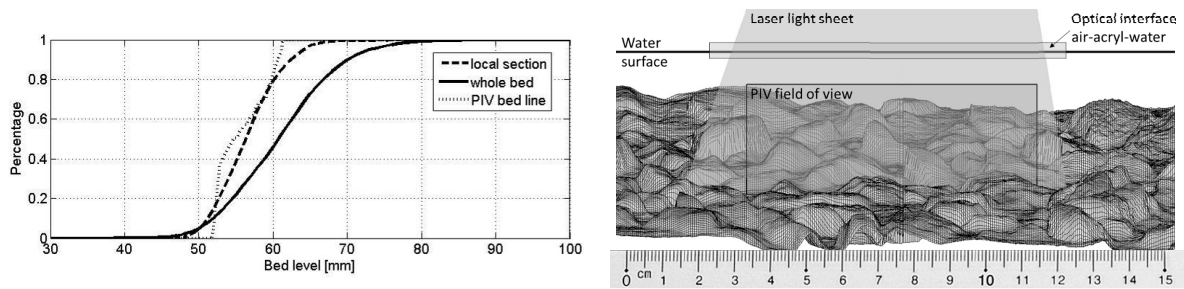


Abb. 2: Kumulative Verteilung der Sohlhöhe über der Rinnensohle (links) und eine 3D Darstellung des PIV-Messbereichs (rechts)

Ein 2D2C-PIV System (Adrian & Westerweel 2011) von Dantec Dynamics wurde in der Symmetrieebene der experimentellen hydraulischen Rinne (Abbildung 2, rechts) angewendet. Im Konkreten wurden folgende Systemkomponenten implementiert: sCMOS Kamera Zyla mit 2560x1920 pix, Quantel Evergreen Doppelpuls laser bis 2x200mJ, Lichtwellenlänge 532nm, Engpass-Kamerafilter, Laser-Sheet Optik, Synchronisationskarte und PC mit Dynamic Studio und adaptiver PIV Processing. Polyamid-Partikel mit einer Größe von 50 μ m wurden als Seeding verwendet. Die Aufnahmedauer pro Experiment betrug 120s wodurch jeweils 1800 2D Geschwindigkeitsfelder mit einer Doubleframerate von 15Hz aufgenommen werden konnten. Als geeignete Zeitdifferenz zwischen den Frames stellten sich 300 μ s heraus. Die Zielgröße der Interrogation-Flächen betrug 16x16pix. Dies entspricht in etwa einer Fläche von 1x1mm² am Modell. Die Gesamtbreite eines Vektorfelds hatte eine Größe von ca. 150mm. Um unerwünschte Refraktionen und Schwankungen des Lichtschnittes am Übergang von Luft und Wasser zu vermeiden wurde eine durchsichtige Plexiglas konstruktion (eine Art Schiffchen mit einer Breite von 20mm und einer Länge von 300mm) entwickelt. Aufgrund dessen wurde das auszuwertende Geschwindigkeitsfeld um etwa 17mm, beginnend vom Wasserspiegel reduziert, da es hier evtl. zu Beeinflussungen der Strömung gekommen wäre. Die gemessenen horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitsvektorkomponenten $u(x,z,t)$ und $w(x,z,t)$, wurden für die weitere Berechnung wie folgt verwendet:

– *Temporäre Abweichung der Geschwindigkeit:*

$$u'(x, z, t) = \bar{u}(x, z) - u(x, z, t) ; w'(x, z, t) = \bar{w}(x, z) - w(x, z, t) \quad (2)$$

– *Lokale Abweichung der Geschwindigkeit:*

$$\tilde{u}(x, z) = \langle \bar{u} \rangle(z) - \bar{u}(x, z) ; \tilde{w}(x, z) = \langle \bar{w} \rangle(z) - \bar{w}(x, z) \quad (3)$$

– *Totale Schubspannung nach dem Konzept der zweifachen Mittelung (Gl. (1)):*

$$\tau_{uw}(z) = \rho A(z) \left(\nu \left\langle \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial z} \right\rangle(z) - \langle u'w' \rangle(z) - \langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle(z) \right) \quad (4)$$

Wobei \bar{u}, \bar{w} die zeitlich gemittelten Geschwindigkeitskomponenten in der Ebene (x, z) und $\langle \bar{u} \rangle, \langle \bar{w} \rangle$ die doppelt-gemittelten Geschwindigkeitsprofile (z) darstellen. $A(z)$ quantifiziert das Verhältnis der mit Wasser befüllten Fläche zwischen den Sohlrauheitselementen zur Gesamtfläche in einer z -Ebene, $0 < A(z) < 1$ (Campbell et al. 2005, Nikora et al. 2013).

3.2 Ergebnisse

In Abbildung 3 werden normierte Profile der Geschwindigkeit u/U , der Turbulenzintensität σ_u/u^* , σ_w/u^* und der Reynolds'schen Schubspannung τ/τ_0 abgebildet. Die Sohl Schubspannung τ_0 als auch die Schubgeschwindigkeit u^* wurden aus der gemessenen linearen Verteilung der gesamten Schubspannung nach Gl. (1) im Bereich $0,78 > z/H > 0,65$ (an der die Schubspannung mit $1-z/H$ übereinstimmt) durch lineare Extrapolation zur Sohle ermittelt. Im

Bereich $z/H < 0,5$ konnten nur die doppelt-gemittelten Werte ermittelt werden. Der Bereich $0,6 > z/H > 0,4$ zeichnet sich mit perfekter logarithmischer Verteilung aus. Bei $z/H > 0,6$ nimmt der Einfluss der Wände und des Wasserspiegels (Wellenbildung, Rückgang der Geschwindigkeit) zu. Die mittlere Fließgeschwindigkeit $u/U=1$ und wurde in $z/H=0,45$ gemessen. Dies ist ungefähr die Stelle, an der die Reynolds'sche Schubspannung am größten ist und in Richtung Sohle abnimmt. Aus den Profilen $\sigma_u(z)$ und $\sigma_w(z)$ wird ersichtlich, dass die Turbulenz mit Sedimentzugabe größer ist als ohne Zugabe, wobei die Differenzen bei lokaler Verteilung größer sind als bei den zweifach-gemittelten Profilen. Andererseits weist die Reynolds'sche Schubspannung in den mit Sediment belasteten Bereichen kleinere Werte auf, als bei jenen ohne Sediment.

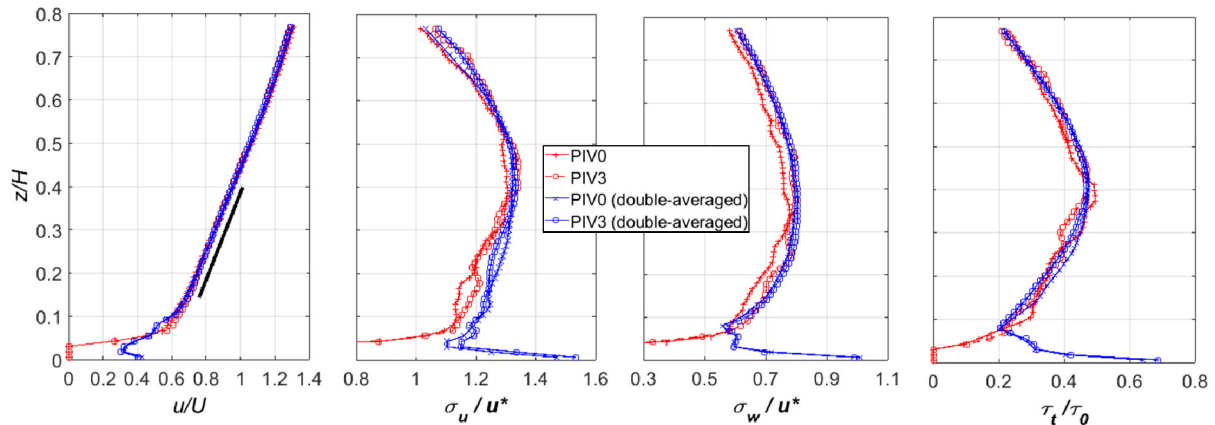


Abb. 3. Profile der Geschwindigkeit, Turbulenzintensität und der Reynolds'schen Schubspannung gemessen lokal in einer Senkrechten (in rot) und doppelt-gemittelt über die Länge des Messbereichs (in blau). Im Diagramm links deutet die schwarze Linie den linearen Verlauf der Geschwindigkeit an

Es wurden alle bekannten Anteile der gesamten Schubspannung laut Gl. (1) ausgewertet und in Abbildung 4 für den Fall ohne (PIV0) und mit (PIV3) Sedimentzugabe dargestellt. Der Reynolds'sche Anteil der Schubspannung dominiert eindeutig im gesamten Profil und im Bereich $0 < z/H < 0,6$ weicht dieser von der Linie $1-z/H$ ab. Der „form-induzierte“ Anteil gewinnt im Bereich $0 < z/H < 0,2$ und $z/H > 0,45$ an Bedeutung. Das Maximum der form-induzierten Schubspannung korreliert mit dem lokalen Minimum der Reynold'schen Schubspannung bei $z/H=0,08$. Die viskose Komponente der Schubspannung ist vernachlässigbar klein (signifikanter wird diese im Sohlbereich bei $z/H < 0,1$). Anhand des Vergleiches zwischen den Experimenten mit und ohne Sedimentzugabe konnte eindeutig festgestellt werden, dass zwischen $0,08 < z/H < 0,6$ die Verläufe der Schubspannungen voneinander abweichen. Die gesamte Schubspannung bei Sedimentzugabe wurde zwischen $0,12 < z/H < 0,4$ signifikant kleiner (um ca. 10 %). Die Strömung über der rauen Sohle zeigt ein 3D Verhalten mit einer internen (turbulenten) Schicht (beeinflusst durch die lokale Sohltopografie), welche bis zu $z/H=0,6$ reicht und ca.um das 6-fache höher ist als die Grobstrukturen an der Sohle. Die Präsenz von bewegten Sedimenten verursacht weitere Abweichungen des Schubspannungsprofils von dem Linearen. Die form-induzierte Schubspannung grenzt die form-induzierte Unterschicht bei $z/H < 0,2$ ab. Als äußere Schicht kann der Bereich mit $z/H > 0,4$ bezeichnet werden. Der Übergang von der inneren auf die äußere Schicht, $0,4 < z/H < 0,6$, stellt die logarithmische Unterschicht dar. In Bezug auf die allgemeine Fließformel wird die Sohl Schubspannung um 35 % (Fall ohne Sedimentzugabe), bzw. um 30 % (Fall mit Sedimentzugabe) unterschätzt (Tabelle 1). Folglich werden auch die Sediment basierten Parameter, wie die Froude- und Reynolds-Zahlen: $Fr^*=u^2/(\Delta g d_s)$ und $Re^*=(u^* d_s)/\nu$, wo $\Delta=1,6$, unterschätzt. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es durch die Zugabe von Sediment zur Reduzierung der lokalen Schubspannungen um ca. 5–7% kommt und gleichzeitig um rund 5% höhere Fließgeschwindigkeiten im Bereich der form-induzierten Unterschicht, gegenüber dem Fall ohne Sedimentzugabe, gemessen worden sind. Beides deutet drauf hin, dass das bewegte Sediment zu einer schnelleren Dissipation der Sohl-turbulenz und somit

zur Reduktion der Schubspannung beiträgt, wodurch es zu einer Erhöhung der Geschwindigkeit in sohnahen Bereichen kommt.

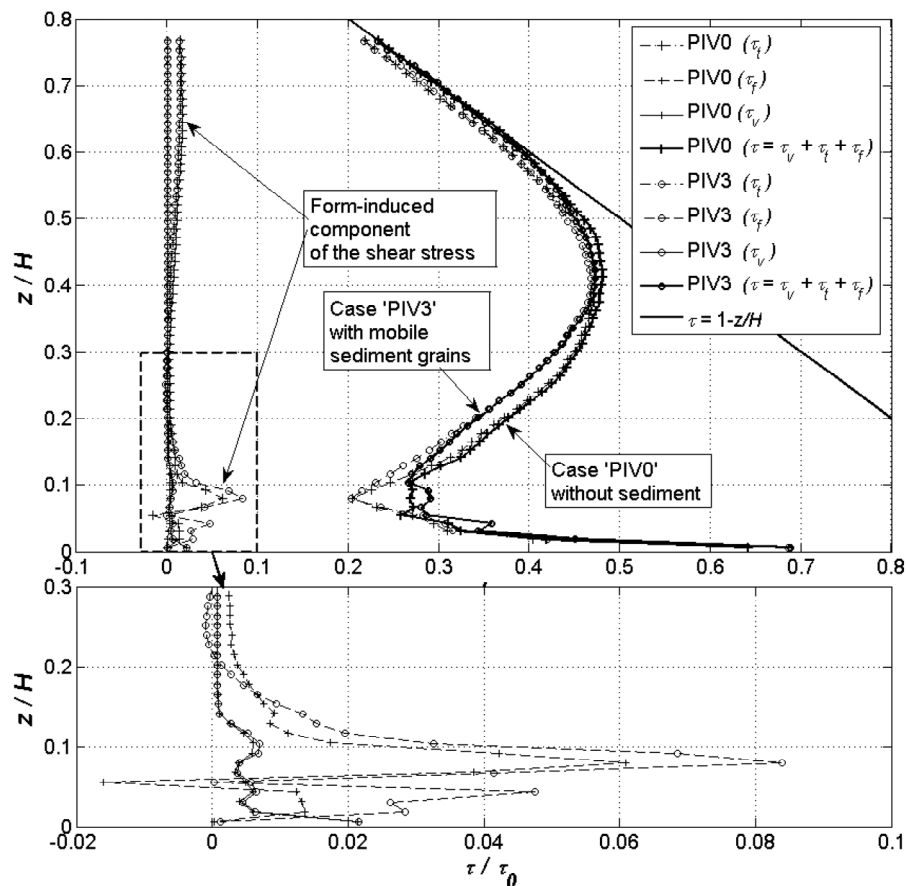


Abb. 4. Normalisiertes Schubspannungsprofil aus der PIV-Messung nach Gl. (1)

Tabelle 1. Experimentelle Ergebnisse der Sohlschubspannung (links) und der Fließformel (rechts)

Experiment	τ_0 (extrapoliert) (N/m ²)	$u^* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ (m/s)	Fr^*	Re^*	$\tau_0 = \rho gHS$ (N/m ²)	$u^* = \sqrt{gHS}$ (m/s)	Fr^*	Re^*
PIV0	17.23	0.131	0.36	393	11.31	0.106	0.24	318
PIV3	16.03	0.127	0.34	381				

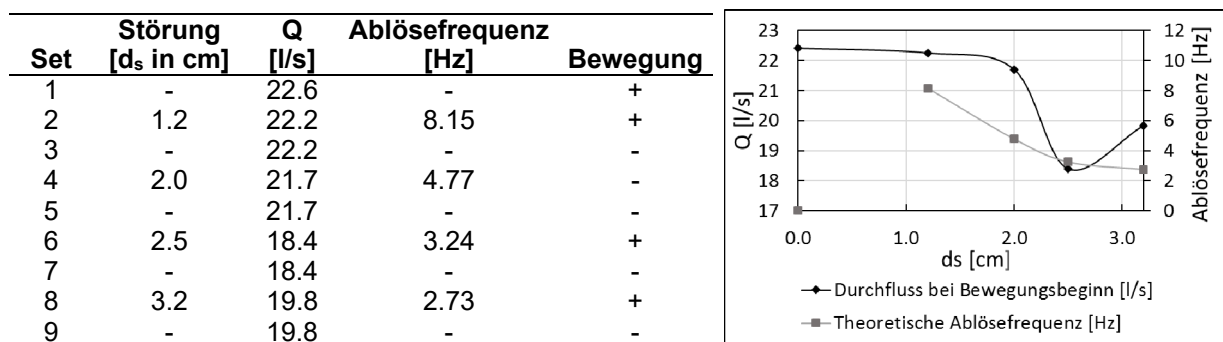
4. Tomo PTV Untersuchungen über den Bewegungsbeginn eines einzelnen Steines

Ziel der Arbeit ist es den Bewegungsbeginn eines einzelnen Steines hervorgerufen durch einen Störkörper zu untersuchen. Die Hypothese, dass hinter einem Störkörper, wie zum Beispiel einem runden Brückenpfeiler, Sedimente durch Turbulenzen in Bewegung versetzt werden, soll geprüft werden. In der Natur und auch unter Laborzuständen kann oft beobachtet werden, dass in unbeeinflussten Fließbereichen keine Sedimentbewegungen stattfindet. Erst, durch Turbulenzen verursacht durch den Störkörper, beginnt der Sedimenttransport trotz gleicher Strömungszustände (Wasserspiegel und Durchfluss). Um den Einfluss einer zylindrischen Störung zu beziffern wurden Versuche mit vier unterschiedlichen Störungsdurchmessern auf den Bewegungsbeginn eines einzelnen Steines mittels zeitaufgelöster Partikel Tracking Velocimetry (4D PTV-Shake the Box) untersucht und mit dem unbeeinflussten Bewegungsbeginn des Steines verglichen.

4.1 Methodik

Alle Versuche fanden in einer Rinne (glatte Sohle) mit einer Länge und Breite von 15m zu 0,33m und einer Neigung von null Promille im Wasserbaulabor der Universität für Bodenkultur statt. In der Mitte der Rinne und des ausgewiesenen Messbereiches wurde eine zylindrische Störung d_s montiert und der Stein (Längs- zu Querachse 3,1cm zu 2,9cm) 12cm nach dieser positioniert. Der Durchfluss wurde langsam gesteigert bis der Stein in Bewegung versetzt wurde. Um stationäre Zustände zu gewährleisten wurde nach jedem Steigerungsschritt des Durchflusses, bis zum Bewegungsbeginn des Steines, abgewartet bis der Wasserspiegel unverändert blieb. Die Unterwasserregulierung (Rückstauklappe) befand sich während allen Versuchsdurchgängen auf derselben Einstellung. Die durchgeführten Messungen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Versuche und deren Eingangsgrößen (links). Grafische Darstellung des Einflusses vom Störungsdurchmesser auf den Bewegungsbeginn des Steines sowie die theoretische Ablösefrequenz an der Störung



Um berührungslos dreidimensionale Geschwindigkeiten bei Bewegungsbeginn des Steines zu messen wurden zeitaufgelöste Messungen mittels vierdimensionalen Partikel Tracking Velocimetry (4D-PTV, Shake the Box oder STB) durchgeführt. Dabei kamen ein Laser (LDY PIV Laser) mit Volumenoptik und vier Highspeed Kameras (Imager Pro HS 4M CMOS) in linearer Konfiguration zum Einsatz (Abb. 5).

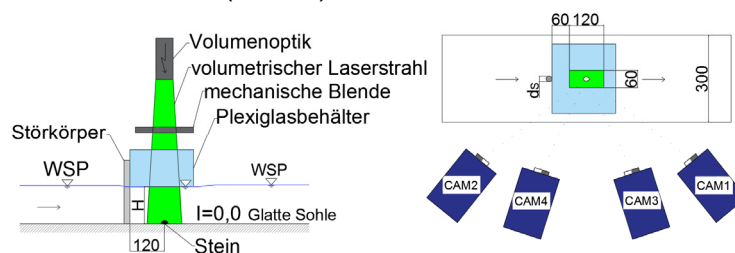


Abb. 5: Versuchsaufbau (linkes Bild – Frontalsicht; rechtes Bild – Draufsicht)

In den internen Wasserkreislauf der Versuchsrinne wurden Seedingpartikel aus Polyamid mit einem Durchmesser von $50\mu\text{m}$ zugegeben. Diese Partikel bewegen sich mit der Strömung und werden durch den Laser, der zu einem Volumen (X/Y/Z entspricht 12cm/6cm/15cm) aufgefächert war, beleuchtet. Das reflektierte Licht der Partikel wird mit den Kameras aufgenommen und durch die synchrone Belichtung (Frequenz von 0,8kHz) des Lasers und der Bildaufnahme der Kameras kann der Zeitbezug und somit die Geschwindigkeit der Partikel im Raum (X/Y/Z) durch Verwendung des Shake The Box (STB) Algorithmus bestimmt werden. Prinzipiell kann bei der Auswertung zwischen tomografischer Partikel Image Velocimetry (Tomo-PIV) und Partikel Tracking Velocimetry (3D-PTV) unterschieden werden. Bei Tomo-PIV Auswertungen wird das gesamte Volumen rekonstruiert wodurch hohe räumlich Auflösungen im Gegensatz zu konventionellen 3D-PTV Auswertungen, bei denen nur die Partikelbewegung ausgewertet wird, erzielt werden. Jedoch werden bei der TOMO-PIV Aus-

wertung auch Geschwindigkeiten an der Stelle des Steins berechnet die nicht der Realität entsprechen. Dies ist bei Partikel-Tracking Methoden nicht der Fall, da hier nur die Partikel verfolgt werden. Im Vergleich zu herkömmlichen dreidimensionalen Partikel Tracking Methoden, die hinsichtlich ihrer räumlichen Auflösung durch die Verwendung von geringer Seedingdichte begrenzt sind, ist Shake the Box (TOMO-PTV) mit Seedingdichten bis zu 0,05ppp vergleichbar in der räumlichen Auflösung mit tomografische PIV Methoden (Schanz 2013). Dieser Algorithmus basiert auf der „Lagrangian particle tracking“ Methode die durch die Bewegung der Partikel ihre Trajektorien (Bahnlinien) bestimmt. STB nützt die Vorhersage der dreidimensionalen Partikelposition für den folgenden Zeitschritt der Bildserie um die Trajektorie der Partikel zu rekonstruieren. Dies kann durch die Extrapolation von bereits bekannten Trajektorien auf den nächsten Zeitschritt (nächstes Bild) erreicht werden. Die vorhergesagte Partikelposition wird im Anschluss mittels iterativem Bildkorrelationsverfahren korrigiert. Dabei werden die Partikelpositionen zweier Zeitschritte solange verschoben (shake) bis diese übereinstimmen (Wieneke 2013). Vor den Messungen wurde der Aufnahmebereich mittels eines 3D-Targets und der Verwendung des 3rd order polynomial Fit-Models kalibriert. Bei den Messungen (Set 1-Set 9) wurde mit einer Frequenz von 0.8kHz über eine Zeitdauer von 6.6 Sekunden gemessen. Dadurch ergeben sich pro Messung 5315 Bilder. Aufgenommen wurde im Single Frame Mode mit einer Auflösung der High Speed Kameras von 1242*2034 Pixel. Für die weitere Auswertung wurde Shake the Box verwendet. Nur Partikel mit einer Helligkeit größer als 70 Counts und einem maximalen Partikelshift von 10 Voxel wurden zur Auswertung herangezogen. Dadurch konnten pro Messung rund 10.000 Partikeltracks rekonstruiert werden. Die finalen Vektorbilder wurden bei 75 Prozent Überlappung bei einem Volumen von 100 Voxel berechnet.

4.2 Ergebnisse

Abbildung 6 zeigt die aus 3500 Zeitschritten zeitlich gemittelten vertikalen Geschwindigkeitsprofile ($u/v/w$), 0,5cm vor dem Stein bevor dieser seinen Bewegungsbeginn hatte (für Set 1-6-7, siehe Tabelle 2). Es ist zu erkennen, dass bei Set 1 ($Q=22,6l/s$) der Stein bei einer mittleren horizontalen Geschwindigkeit $U=0,45m/s$ und ohne Störkörper in Bewegung versetzt wird. Im Vergleich dazu hat der Stein bei einer mittleren Geschwindigkeit von $U=0,32m/s$ (Set 6 mit eingebauter Störung $d_s=2,5cm$) seinen Bewegungsbeginn. Bei Set 7 konnte eine mittlere Geschwindigkeit von $0,41m/s$ gemessen werden. Dieses ist im Setting bis auf die fehlende Störung ident mit Set 6 und der Stein verweilt in diesem Set in Ruhe.

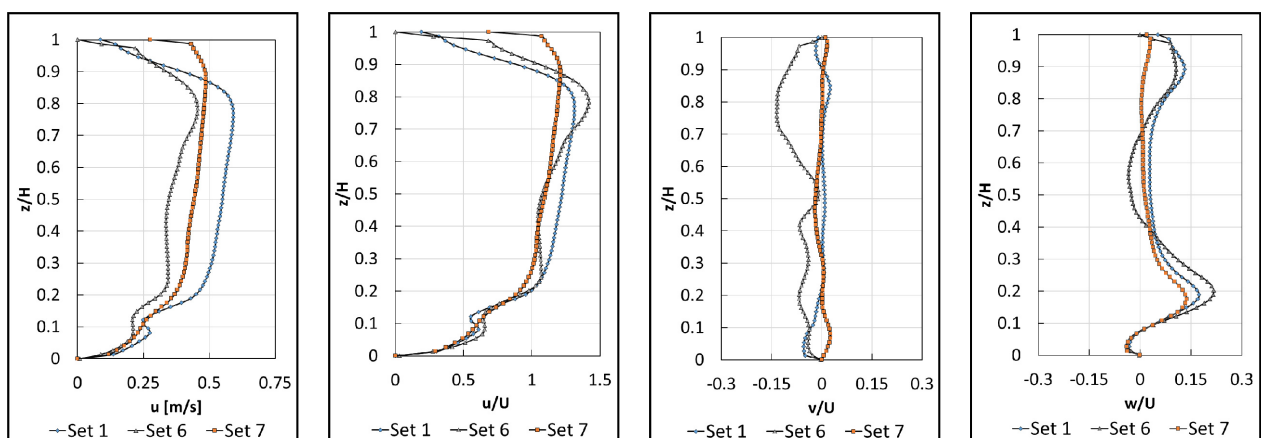


Abb. 6. Horizontalen Geschwindigkeiten (links) und normalisierte zeitlich gemittelte Geschwindigkeitsprofile der u/U , v/U , w/U Komponenten im Vergleich für Set 1-6-7

Hinsichtlich der mittleren Quergeschwindigkeiten V konnte festgestellt werden, dass jene bei Set 6 (mit Störung) den größten absoluten Wert $-0,02m/s$ aufweisen. Vergleichsweise dazu

liegen diese für Set 1 und Set 7 bei $1 \cdot 10^{-3}$ und $3.6 \cdot 10^{-5}$. Anhand der vertikalen Geschwindigkeitsprofile wird ersichtlich, dass es vor dem Stein, dieser befindet sich bei z/H zwischen 0,0 und 0,2 zu einem Anstieg der w Komponente kommt. Im Szenarienvergleich ist das Verhältnis von w/U bei Set 6 (mit Störkörper) am stärksten ausgeprägt. Die vertikal gemittelten Geschwindigkeiten sind jedoch häufig kein guter Prädiktor für Bewegungsbeginn (Sindelar & Smart 2016).

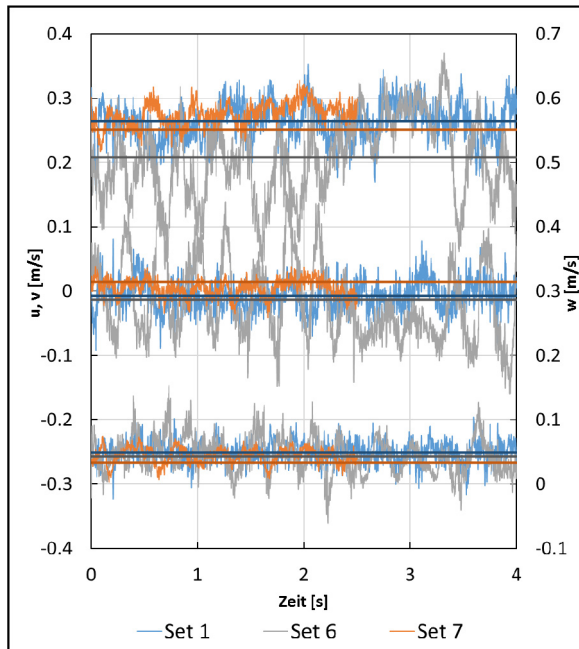


Abb. 7a: Lokale Geschwindigkeiten (u, v, w) und Mittelwerte (U, V, W) für Set 1-6-7

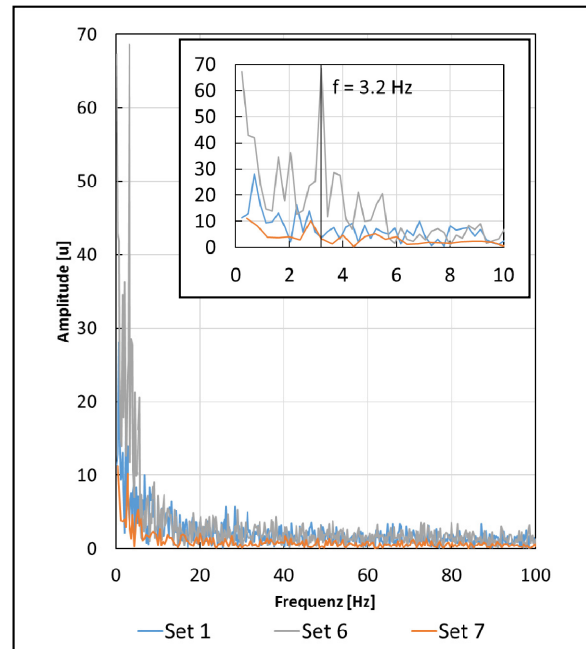


Abb. 7b: Diskrete Fourier-Analyse der horizontalen Geschwindigkeit u für Set 1-6-7

Laut Schmeeckle et al. (2007) ist die lokale Geschwindigkeit unmittelbar flussauf eines Einzelsteines geeigneter um den Bewegungsbeginn zu beschreiben. Für die Sets 1-6-7 wurde die gemittelte lokale Geschwindigkeit in Strömungsrichtung U_{lokal} 0,5cm flussauf des Steines und 2,0cm über der Sohle (Steinhöhe=3,1cm) aus den Messdaten ermittelt. Die Messdauer betrug für Set 1 und Set 6 jeweils 4,0s und bei Set 7 2,5 s. Für Set 1 ($Q=22,6\text{l/s}$ ohne Störung) ergibt $U_{\text{lokal}} = 0,265\text{m/s}$. Für Set 7 ($Q=18,4\text{l/s}$ ohne Störung) beträgt $U_{\text{lokal}} = 0,251\text{m/s}$. Am geringsten ist $U_{\text{lokal}} = 0,208\text{m/s}$ für Set 6 ($Q=18,4\text{l/s}$ - Störung mit $d=2,5\text{cm}$). Bei diesem Fall wurde der Stein ebenso bewegt wie bei Set 1. Für die betrachteten Sets 1-6-7 ist die mittlere lokale Geschwindigkeit daher kein guter Prädiktor für den Bewegungsbeginn. In Abbildung 7a sind die Zeitreihen der lokalen Geschwindigkeiten u, v, w sowie deren Mittelwerte (U, V, W) für die Sets 1-6-7 dargestellt. Auffällig ist die starke, periodische Fluktuation in Set 6, die durch die zylindrische Störung flussauf verursacht wird. Die Periodizität ist auch deutlich in der Querkomponente v und weniger ausgeprägt in der Vertikalkomponente w erkennbar. In Abbildung 7b ist die diskrete Fourier-Analyse für die Strömungsgeschwindigkeit u für die Zeitreihen der Sets 1-6-7 dargestellt. Während in Sets 1 und 7 keine dominanten Frequenzen erkennbar sind, ist bei Set 6 eine erhöhte Amplitude bei 3,2Hz zu verzeichnen. Dies deckt sich sehr gut mit der theoretischen Ablösefrequenz von 3,24Hz (vgl. Tabelle 2). Dies legt den Schluss nahe, dass der Bewegungsbeginn in Set 6 durch die Wirbelablösungen hervorgerufen wird.

5. Schlussfolgerungen

Die lokal ermittelten Sohlschubspannungen mittels Turbulenzmessungen mit PIV und unter Anwendung des double-averaging Konzepts zeigten signifikant größere Werte auf, als jene die sich aus der Impulsgleichung und Querschnittsparametern (H oder R_h und S) ergaben

(Tabelle.1). Dies bestätigte, dass die Sohlschubspannungswerte im Querschnitt in Abhängigkeit von lokalen Rauheitsverhältnissen stark variieren und entsprechend lokale Erhöhung des Sedimenttriebs hervorrufen können. Bemerkenswert ist insbesondere die Feststellung, dass die eigentliche Sedimentbewegung die Fließresistenz der rauen Sohle und die gemessene Schubspannung verkleinert hatte, wobei die Turbulenz größer wurde. Anhand der 4D-PTV Messungen konnte gezeigt werden, dass zur Beurteilung des Bewegungsbeginns eines einzelnen Steines die Betrachtung der mittleren Geschwindigkeiten nicht ausreichten um den Prozess zu beschreiben. So war die zeitlich gemittelte Geschwindigkeit bei Set 6 mit 0,32m/s um rund 20 Prozent geringer als bei Set 7. Beide Sets waren im Setting ident und unterschieden sich nur durch die vorhandene Störung (Set 6 – $d_s=2,5\text{cm}$, Set 7 – keine Störung). Auch hinsichtlich der lokalen mittleren Geschwindigkeiten 0,5cm vor dem Stein war die Geschwindigkeit bei Set 6 geringer als bei Set 7. Aufgrund dessen wird vermutet, dass die Ablösungen, erzeugt durch die Störung, verantwortlich für den früheren Bewegungsbeginn des Steines sind. In Zukunft liegt der Fokus auf der detaillierten Betrachtung und der quantitativen Erfassung der Ablösungen und deren Einfluss auf den Bewegungsbeginn eines Steines. Messtechnisch betrachtet liegt der Fokus in der vertiefenden Anwendung von TOMO-PTV und vor allem in Anwendung von 3D-Pressure PIV.

Dankesworte

Die Autoren bedanken sich bei der EQ-BOKU für die Finanzierung der Messgeräte.

Literatur

- Adrian, R.J. & Westerweel, J., 2011:** "Particle Image Velocimetry", Cambridge: Cambridge University Press.
- Campbell, L., McEwan, I., Nikora, V., Pokrajac, D., Gallagher, M. & Manes, C., 2005:** "Bed-Load Effects on Hydrodynamics of Rough-Bed Open-Channel Flows.", *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(7), 576-585.
- Celik, A. O., Diplas, P., & Dancy, C. L., 2013:** "Instantaneous turbulent forces and impulse on a rough bed: Implications for initiation of bed material movement", *Water Resources Research*, 49(4). 2213–2227, <http://doi.org/10.1002/wrcr.20210>
- Cermak, J.E., 1971:** "Laboratory Simulation of the atmospheric Boundary Layer", *AIAA Journal*, Vol. 9, No. 9, pp.1743-1754
- Lichtneger, P., Sindelar, C. Habersack, H, Kitzhofer, J., Prager, E.A., 2016:** „Experimental investigation on local shear stress and turbulence intensity over a rough bed with and without sediment using Laser Doppler Anemometry and Particle Image Velocimetry“, 13th International Symposium on River Sedimentation. September 19 – 22, 2016 in Stuttgart, Germany.
- Nikora, V., Goring, D., McEwan, I. & Griffiths, G., 2001:** "Spatially averaged open-channel flow over rough bed.", *J. Hydraul. Eng.* 127(2): 123–133.
- 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.
- Schanz, D., Schröder, A., Gesemann, S., Michaelis, D., Wieneke, B., 2013:** "Shake The Box: A highly efficient and accurate Tomographic Particle Tracking Velocimetry (TOMO-PTV) method using prediction of particle positions", 10th Int. Symp. on PIV, Delft, The Netherlands 1-3 July 2013
- 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. <http://doi.org/10.1029/2006JF000536>
- Shields, A., 1936:** "Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung". Mitteilung Der Preussischen Versuchsanstalt Für Wasserbau Und Schiffbau.
- Sindelar, C., Smart, G., 2016:** "Transition Flow in Step-Pool Systems: Pressure Distributions and Drag Forces". *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(10), 4016035. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001165](http://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001165)
- 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), 15103. <http://doi.org/10.1063/1.4774341>
- Wieneke, B., 2013:** "Iterative reconstruction of volumetric particle distribution", *Meas. Sci. Technol*, 24 024008