# Transportverhalten von Feinsand und Leichtgewichtsgranulat im Natur-Modell-Vergleich

Stefan Schäfer, Technische Universität München, Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft Verseis Fuche, Technische Universität München, Versuchsenstalt für Wasserbeu und Wasserwi

Yannic Fuchs, Technische Universität München, Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft

# Einleitung

Die Quantifizierung von Sedimenttransport ist eine wichtige Aufgabe in der Hydromorphologie und gleichermaßen für Geographen, Ingenieure und Ökologen von Bedeutung. Aufgrund der Komplexität von Sedimenttransportprozessen wird bis heute an allgemeingültigen Vorhersagemodellen geforscht (Yalin 1972, Zanke 1982, Gyr und Hoyer 2006, Ancey et al. 2014). Physikalische Laboruntersuchungen von flussmorphologischen Fragestellungen spielen in diesem Kontext eine wichtige Rolle und ihr Anwendungsbereich erstreckt sich von großräumigen Modellen bis hin zu Untersuchungen auf Kornebene und darunter (Yalin 1971, Hughes 1993, Kirkegaard et al. 2011). Im Labor können komplexe hydromorphologische Prozesse unter kontrollierten Versuchsbedingungen nachgebildet werden und es lässt sich eine Vielzahl verschiedener Messwerte gleichzeitig, reproduzierbar und mit hoher Genauigkeit erfassen.

Neben Naturmaterialien wie Sand und Kies kommen in flussmorphologischen Laboruntersuchungen immer wieder auch Leichtgewichtsgranulate als Ersatzmaterialien zum Einsatz, zumeist wenn verfälschende Maßstabseffekte es nicht erlauben, das Naturmaterial herunter zu skalieren. Stattdessen ermöglichen es Leichtgewichtsgranulate mit geringerer Dichte und größerem Korndurchmesser in hydraulisch ähnlichen Froude-Modellen auch morphologische Prozesse annähernd ähnlich abzubilden. Aufgrund der nicht maßstäblichen Granulatkörner ergibt sich jedoch sowohl eine Modellüberhöhung als auch eine zu hohe Sohlrauheit (Kobus 1978), was zu Fehlern in der ähnlichen Abbildung von Transportprozessen führt, vor allem wenn die engen Anwendungsgrenzen der Ähnlichkeitstheorie für die Bearbeitung der morphologischen Fragestellung nicht gänzlich eingehalten werden können.

Für einen solchen Fall, in dem die Bedingung  $d_r = \Delta \rho_r^{-1/3}$  zwischen der Maßstabszahl für die Feststoffdichten und dem Maßstab für die Korndurchmesser nicht erfüllt werden kann, wurden in der vorliegenden Untersuchung vergleichende Versuche zur Transportkörperentwicklung von einem enggestuften Quarzsand und einem ebenfalls enggestuften Leichtgewichtsgranulat in einer geraden Versuchsrinne durchgeführt. Über Ähnlichkeitsbetrachtungen wurden die Versuche mit Quarzsand als Prototyp und die Versuche mit Leichtgewichtsgranulat als Modellversuch miteinander in Beziehung gesetzt und dann die Entwicklung der Sohltopografie mit Hilfe eines berührungslosen Lasermessverfahrens aufgezeichnet. Durch die vergleichende Betrachtung der Transportkörperentwicklung sollten Rückschlüsse auf die Übertragbarkeit der nicht mehr modellähnlichen Transportversuche mit Leichtgewichtsgranulat gezogen werden.

# Methodik

Den im Folgenden gemachten Betrachtungen liegen im Wesentlichen die Ausführungen von Yalin (1971), Kobus (1978) und Hughes (1993) zu Grunde. Für die Bestimmung der Maßstäbe wurden die bei Kobus (1978) vorgeschlagenen Schemata verwendet.

Versuchskonzept:

Für den Prototyp mit Quarzsand wurden in einer geraden Versuchsrinne bei stationären Fließverhältnissen verschiedene Ausgangs-Sohllängsneigungen eingestellt und die sich verändernde Sohltopografie zu definierten Zeitpunkten im laufenden Betrieb aufgezeichnet. Im Anschluss daran wurden vergleichende Modellversuche mit dem Leichtgewichtsgranulat durchgeführt und dazu zwei unterschiedliche Ähnlichkeitsbetrachtungen angestellt: das erste Szenario hatte zum Prototyp einen Maßstab 1:6,5 und war nicht überhöht, das zweite Szenario hatte einen Maßstab 1:1 und war 2,55fach überhöht. Tabelle 1 zeigt die durchgeführten Versuche. Die verwendeten Feststoffe sind in Bild 1 dargestellt.

	#	S [‰]	h [m]	Q [l/s]
Quarzsand	1	0,10	0,65	57
	2	0,50	0,65	128
	3	1,00	0,65	181
TPU-Granulat	4	0,10	0,10	3
M 1:6,5   n = 1	5	0,50	0,10	8
	6	1,00	0,10	11
TPU-Granulat	7	0,04	0,25	14
M 1:1   n = 1/2,55	8	0,20	0,25	31
	9	0,39	0,25	44

Tabelle 1:Versuchskonzept mit jeweils 3 Versuchen pro Szenario



Bild 1: Links: Quarzsand DORSILIT 9,  $d_m = 0.3 \text{ mm}$ ,  $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$ . Rechts: TPU-Granulat,  $d_m = 3.7 \text{ mm}$ ,  $\rho_s = 1.10 \text{ g/cm}^3$ .

Versuchsaufbau:

Die vorgestellten Untersuchungen wurden in einer geraden Versuchsrinne mit Länge L = 10 m und Breite B = 0,40 m durchgeführt. Die obersten 2 m der Versuchsrinne dienten als Mobilisierungsstrecke mit Sedimentdepot, die anschließenden 8 m Messstrecke wurden mittels Laserscanner vermessen. Das Sohlmaterial war zu Versuchsbeginn 25 cm hoch eingebaut, zuzüglich dem Anteil aus der Sohlneigung an der jeweiligen Stelle, und wurde im Anschluss an die Versuchsrinne in einem Absetzbecken gesammelt. Der Abfluss und die Fließtiefe wurden während einer Messung konstant gehalten, sodass sich am Ende der Versuchsdauer eine Gleichgewichtssohle einstellen sollte. Der Laserscanner war unterstrom der Versuchsstrecke auf einem Podest erhöht aufgestellt, um auch die steiler abfallenden Lee-Seiten der Transportkörper mit guter Qualität aufzeichnen zu können.



Bild 2: Versuchsstand schematisch, Längsschnitt.

Nummerierung zu Bild 2:

- 1. Wasserspiegel mit Fließtiefenmessung am Beginn der Messstrecke
- 2. Bewegliches Sohlmaterial
- 3. Laserscanner zur Vermessung der Sohltopografie
- 4. Absetzbecken für Sedimente und Fließtiefenregelung mittels überströmbarem Schütz

## Messverfahren:

Im Vorfeld der Untersuchungen wurde ein Messverfahren entwickelt, bei dem ein handelsüblicher Puls-Laufzeit Laserscanner im sichtbaren grünen Wellenlängenbereich (532nm) während des Versuchsbetriebs durch die Wasseroberfläche misst und dabei Messgenauigkeiten der Einzelmessungen im Bereich der Kornrauheit (1-2 mm) erreicht. Durch Ausgleichsrechnung kann dieser Fehler weitgehend kompensiert werden. Der gesamte Messprozess erstreckte sich über drei Phasen: Stationierung über räumliche Festpunkte, Scannen der Sohltopografie und Monitoring der Umgebungsparameter. Die Minimaldauer eines Scans war abhängig von der gewünschten Auflösung und betrug in der vorgestellten Untersuchung ca. eine Minute.

Während der Messung wurde der Abfluss innerhalb kurzer Zeit komplett gestoppt und der Wasserspiegel dabei konstant gehalten. Beim Wiederanfahren wurde entsprechend vorgegangen. Die durch diesen Vorgang entstandenen Veränderungen der Sohltopografie lagen im Bereich der Messgenauigkeit des Laserscanners. Sie waren somit deutlich geringer als die Veränderung der Sohle während der Messung bei laufendem Abfluss, wodurch sich eine Verzerrung der Transportkörper entsprechend der horizontalen Rotationsrichtung des Laserscanners ergab.

#### Ergebnisse

Die gemessenen Punktwolken jeder Laserscanmessung wurden als Längsschnitte durch die Versuchsrinne dargestellt. Insgesamt wurden 9 Längsschnitte über die Breite der Versuchsrinne ausgewertet und mit ihrem Abstand y<sub>i</sub> zur orografisch rechten Rinnenwand aufsteigend sortiert. Für jeden Längsschnitt wurde ein 0,5 cm breites Band an Messpunkten verwendet (je 0,25 cm links und rechts eines Abstands y<sub>i</sub> von der Rinnenwand) und auf eine Linie projiziert, um ausreichend viele Punkte zur Auswertung zu erhalten. Dieses Punkteband wurde dann mit Hilfe einer Spline-Interpolation zu einer kontinuierlichen Linie verbunden. In Bild 3, Bild 4 und Bild 5 sind jeweils alle 9 Längsschnitte einer Messung übereinandergelegt. Auf diese Weise ließen sich neben dem Verlauf der Sohloberfläche auch Erkenntnisse über die räumliche Ausbildung der Transportkörper gewinnen.



Bild 3: Versuch #3, Quarzsand, Längsschnitte nach 45 min Versuchsdauer.







Bild 5: Versuch #8, TPU-Granulat, Längsschnitte nach 45 min Versuchsdauer.

Für allgemeingültige Aussagen zu den Versuchsreihen wurden aus den Längsschnitten mittlere Transportkörperhöhen und -längen abgeleitet, indem in den Längsschnitten Hoch- und Tiefpunkte als Transportkörperkronen und -täler identifiziert wurden (vgl. Zero-Crossing Analysis bei Nordin (1971)). Diese Ergebnisse lassen jedoch zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Dokuments keine allgemeingültigen Aussagen zu und sind Gegenstand noch laufender Untersuchungen.

## Diskussion

vorgestellten Untersuchung wurde versucht, einen Gleichgewichtszustand In der im Transportgeschehen der einzelnen Versuche zu erreichen und diese untereinander sowohl geometrisch als auch hinsichtlich ihrer zeitlichen Entwicklung zu vergleichen. Für die zum Erreichen des Gleichgewichtszustands erforderliche Versuchsdauer von 30-90 Minuten war die Mobilisierungsstrecke mit Sedimentdepot jedoch zu kurz. Die Sohllage im Bereich der Mobilisierungsstrecke fiel, je nach Transportkapazität des Strömungszustands, früher oder später deutlich unter das Ausgangsniveau. Die gleichbleibende Versorgung der anschließenden Messstrecke Sediment konnte somit nicht sichergestellt werden und das mit Erreichen eines Gleichgewichtszustands war nicht mehr möglich. Dieser Vorgang ist auch in den abgebildeten Längsschnitten zu sehen (vgl. insbesondere Bild 3). Dort war nach einiger Zeit für fast alle Versuche eine Zunahme der Transportkörperhöhe nach oberstrom zu beobachten, die auf die reduzierte Sedimentzufuhr von oberstrom zurückgeführt werden konnte. Neben der unzureichenden Materialversorgung war die Versuchsrinne mit 10 m Länge verhältnismäßig kurz für einen morphologischen Versuch. Gyr und Hoyer (2006) schlagen für eine voll entwickelte, ungestörte Strömung ein Verhältnis von Länge zu Breite von 80 vor.

# Ausblick

In der Zwischenzeit wurde die Versuchsinfrastruktur in einen größeren Versuchsstand verlegt, der zum einen länger ist und zum anderen über eine kontinuierliche Sedimentzugabe verfügt. In diesem Versuchstand sollen die vorgestellten Versuche wiederholt und erneut ausgewertet werden. Es ist davon auszugehen, dass sich mit Hilfe der Sedimentzugabe die angestrebten Gleichgewichtszustände im Transportgeschehen erreichen lassen.

## Literatur

- Ancey, C.; Bohorquez, P.; Bardou, E. (2014): Sediment transport in mountain rivers. ERCOFTAC Bulletin 100, 37–52.
- Gyr, A.; Hoyer, K. (2006): Sediment Transport: A Geophysical Phenomenon, 2006 ed., Springer, Berlin u.a.
- Hughes, S.A. (1993): Physical models and laboratory techniques in coastal engineering, Advanced series on ocean engineering. World Scientific, Singapore.
- Kirkegaard, J.; Wolters, G.; Suterhland, J.; Soulsby, R.; Frostick, L.; McLelland, S.; Mercer, T.; Gerritsen, H. (2011): Users guide to physical modelling and experimentation, 1. ed., IAHR design manual. CRC Press, Boca Raton etc.
- Kobus, H. (Ed.) (1978): Wasserbauliches Versuchswesen. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft (DVWW).
- Nordin, C. F. (1971): Statistical properties of dune profiles. U.S. Govt. Print. Off; Washington.
- Yalin, M.S. (1972): Mechanics of sediment transport. Pergamon Press, Oxford; New York.
- Yalin, M.S. (1971): Theory of Hydraulic Models. Macmillan Education, Limited, London.
- Zanke, U. (1982): Grundlagen der Sedimentbewegung. Springer, Berlin; New York.