

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Author's Postprint

Ettmer, Bernd; Hentschel, Bernd; Link, Oscar

Neue Wege in der experimentellen morphodynamischen Modellierung durch die Verwendung von Kunststoffgranulat-Sieblinien

Wasserwirtschaft

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/110449>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Ettmer, Bernd; Hentschel, Bernd; Link, Oscar (2021): Neue Wege in der experimentellen morphodynamischen Modellierung durch die Verwendung von Kunststoffgranulat-Sieblinien. In: Wasserwirtschaft 111 (5). S. 16-22.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Neue Wege in der experimentellen morphodynamischen Modellierung durch die Verwendung von Kunststoffgranulat-Sieblinien

Bernd Ettmer^a, Bernd Hentschel^b, Oscar Link^c

^a Hochschule Magdeburg-Stadel, Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit

^b Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe

^c Universidad de Concepción, Department of Civil Engineering

Morphodynamische Modellexperimente sind im wasserbaulichen Versuchswesen nach wie vor ein unverzichtbares Hilfsmittel, um die komplexen Fragestellungen, die bei morphodynamischen Prozessen auftreten, einschätzen zu können. Die Übertragung der morphodynamischen Prozesse von Natur auf das Modell ist jedoch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. So wird die Sedimentcharakteristik eine Natursieblinie aus einem Sand-Kies-Gemisch üblicherweise auf ein Modellsediment aus Einkorn-Kunststoffgranulat übertragen. Die Sieblinieneigenschaften des Natursedimentes werden vernachlässigt und die Ähnlichkeit zwischen Natur und Modell ist dadurch eingeschränkt. Bei weitgestuften Natursedimenten verstärken sich diese Unsicherheiten, so dass die Verwendung eines Einkorn-Kunststoffgranulates als Modellsediment in der Regel nicht zielführend ist. Im Rahmen einer Forschungskooperation zwischen der Bundesanstalt für Wasserbau und der Hochschule Magdeburg wurden morphodynamische Experimente in einem Geschiebekreislauf durchgeführt. Für die Experimente wurden eine Sand-Sieblinie und eine Kunststoffgranulat-Sieblinie verwendet. Während die Sand-Sieblinie aus einem abgestuften Natursand bestand war die Kunststoffgranulat-Sieblinie aus einer Mischung verschiedener Kunststoffgranulate aufgebaut. Ziel der morphodynamischen Experimente war es, neue Erkenntnisse zur Anwendung von Kunststoffgranulat-Sieblinien und zur Ähnlichkeit von morphodynamischen Modellexperimenten zu erlangen. Die Ergebnisse zeigten, dass mit den verwendeten Sieblinien aus Sand und aus Kunststoffgranulaten ähnliche Sohlenformen und Transportprozesse erzielt werden konnten.

Kompakt: Morphodynamische Laborexperimente mit einer Sand-Sieblinie und einer Kunststoffgranulat-Sieblinie zeigten deutliche geometrische und morphodynamische Ähnlichkeiten in den Versuchsergebnissen.

1 Einleitung

Experimentelle Untersuchungen mit Sedimenten sind im wasserbaulichen Versuchswesen nach wie vor ein unverzichtbares Hilfsmittel, um die komplexen Fragen zu hydraulisch-sedimentologischen Prozessen, wie bspw. Erosions- und Sedimentationsprozessen, hinreichend genau klären und prognostizieren zu können. Die Durchführung von morphodynamischen Modellversuchen ist aufwändig und erfordert vom Modellierer umfangreiche Erfahrungen. Insbesondere wenn das Natursediment

bereits aus feineren Sedimenten besteht oder sehr ungleichförmig ist, ist eine theoretische Übertragung der charakteristischen Eigenschaften des Natursedimentes, wie Korngröße, Dichte, Kornform und Ungleichförmigkeit, auf ein Modellsediment nur mit erheblichen Unsicherheiten möglich und zudem mit umfangreichen Voruntersuchungen verbunden. Die physikalisch außerordentlich komplexen morphodynamischen Prozesse sind nur mit Einschränkungen zu quantifizieren und die Übertragung der Ergebnisse vom Modell zurück auf die Natur sind z. T. mit erheblichen Unsicherheiten behaftet (u. a. [1], [2], [3], [7]).

Die größte Schwierigkeit stellt die üblicherweise angewandte geometrische Verkleinerung eines Natursedimentes auf ein Modellsediment dar. Eine geometrische Verkleinerung des Natursedimentes bedeutet zum einen, dass das Modellsediment insbesondere bei feinen Natursedimenten im hydraulischen Übergangsbereich ggf. sogar in den hydraulisch glatten Bereich hinein verkleinert wird, wo mit einem Einfluss der Zähigkeit auf die experimentellen Untersuchungen zu rechnen ist (u. a. [1], [2], [5], [6], [10], [11]). Zum anderen bedeutet dies, dass das geometrisch skalierte Natursediment vollständig oder teilweise den bindigen Sedimenten Schluff oder sogar Ton zuzuordnen wäre. Die Modellsedimente würden Adhäsions- und Kohäsionskräften unterliegen, die im Naturmaterial kein Äquivalent haben und eine maßstäbliche Verkleinerung ausschließen. Aus diesen Gründen werden in hydraulisch-sedimentologischen Modellversuchen oftmals Ersatzmaterialien eingesetzt, die bei einer geringeren spezifischen Dichte als das Natursediment einen größeren Korndurchmesser aufweisen. Bereits seit Jahrzehnten werden experimentelle hydraulisch-sedimentologische Untersuchungen mit diesen Ersatzmaterialien, inzwischen fast ausschließlich mit Kunststoffgranulaten, durchgeführt (u. a. [4], [5], [9], [12]). **Bild 1** zeigt exemplarisch einen Modellversuch zu morphodynamischen Fragestellungen an der Isarmündung in die Donau, der an der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Karlsruhe durchgeführt wurde (links) und einen Modellversuch zur Geschiebedurchgängigkeit auf einer Sohlengleite an der Oste in Bremervörde, der an der Hochschule Magdeburg durchgeführt wurde (rechts). In diesen beiden Experimenten wurde das neue Verfahren der Mischung von Kunststoffgranulaten zur Simulation der sehr ungleichförmigen Natursedimentfraktionen angewendet.



Bild 1: Modell der Isarmündung in die Donau (links) und Modell der Sohlengleite Oste in Bremervörde (rechts) mit mehreren Kunststoffgranulat Fraktionen als Modellsediment

Die Übertragung der Eigenschaften des Natursedimentes auf ein geeignetes Modellsediment erfolgt zumeist anhand von Erfahrungswerten und umfangreichen Vorversuchen. In den Vorversuchen wird

üblicherweise die kritische Fließgeschwindigkeit v_{krit} und die Sinkgeschwindigkeit w bestimmt, um bei gleichen hydraulischen Randbedingungen einen identischen Bewegungsbeginn der Sedimente und ein identisches Absinkverhalten in der Natur und im Modell zu gewährleisten. Die Interpretation der Ergebnisse aus den Vorversuchen ist nicht nur wegen der großen Streubreite morphologischer Phänomene mit zum Teil erheblichen Unsicherheiten behaftet. So ist die Bestimmung der kritischen Geschwindigkeit eines Sohlenmaterials nicht eindeutig möglich und liefert in der theoretischen Herleitung wie auch in experimentellen Vorversuchen eine Bandbreite von Ergebnissen (u. a. [2], [12], [13]). Je nach Fragestellung können auch weitere morphologische Parameter maßgebend sein. Allen Verfahren ist jedoch eigen, dass eine sichere theoretische Herleitung zur Übertragung der Eigenschaften des Natursedimentes auf das Modellsediment fehlt und der Aufwand der Vorversuche in der wasserbaulichen Versuchspraxis oft immens ist.

Aus diesem Grund wird in der wasserbaulichen Versuchspraxis das Natursediment zumeist mit einem charakteristischen Korndurchmesser, dem Korndurchmesser d_{50} oder d_m auf ein Modellsediment skaliert. D. h. die Eigenschaften der Sieblinie des Natursedimentes werden im Modell durch ein Einkornsediment aus Kunststoffgranulat repräsentiert. Eigenschaften, wie bspw. Sohlenabplattungseffekte, fraktionierter Transport, Entmischungs- und Vermischungsprozesse, werden nicht oder nur stark eingeschränkt durch das Einkornsediment erfasst.

Um diese Einschränkungen zu reduzieren, zielen die hier beschriebenen experimentellen Untersuchungen darauf ab, eine Natur-Sieblinie in eine Kunststoffgranulat-Sieblinie zu übertragen und in den experimentellen Versuchen eine grundsätzliche geometrische Ähnlichkeit in den Sohlenformen und in den morphodynamischen Prozessen für beide Sohlenmaterialien zu erzielen. Als Natur-Sieblinie wurde eine Sand-Sieblinie verwendet. Die Kunststoffgranulat-Sieblinie wurde aus verschiedenen Kunststoffgranulaten, die als Einkornmaterial vorlagen, gemischt. Maßgebliche Randbedingungen bei den experimentellen Versuchen, wie die Gerinnegeometrie und die Wassertiefe sowie die Füllhöhe des Sedimentes in der Versuchsrinne, wurden als konstante Randbedingungen festgelegt. Als variable Größe wurde die Fließgeschwindigkeit variiert. Hinzuweisen ist darauf, dass mit der Veränderung der Fließgeschwindigkeit eine maßgebliche Größe, das Wasserspiegellagengefälle, und somit das Energieliniengefälle verändert wurde. Die Sohlenschubspannung und somit die Feststoff-Froude Zahl Fr^* wurden nicht konstant gehalten. Um eine geometrische und morphodynamische Ähnlichkeit zwischen dem Sandversuch und dem Kunststoffgranulatversuch zu erzielen, wurden neue Ähnlichkeitskriterien verwendet und diese durch umfangreiche Vorversuche abgesichert.

2 Ähnlichkeitskriterien

Ähnlichkeitskriterium 1: Übertragung der Sieblinieneigenschaften einer Sand-Sieblinie auf eine Kunststoffgranulat-Sieblinie

Die maßgeblichen Eigenschaften von Sohlenmaterialien werden mit dem sedimentologischen Durchmesser D^* beschrieben (u. a. [2], [5], [8], [9], [10], [11]). D^* ist über den Quotienten $(Re^{*2}/Fr^*)^{1/3}$ definiert und beinhaltet über die relative Dichte $\rho' = (\rho - \rho_w)/\rho_w$ die Dichte des Sedimentes ρ , die

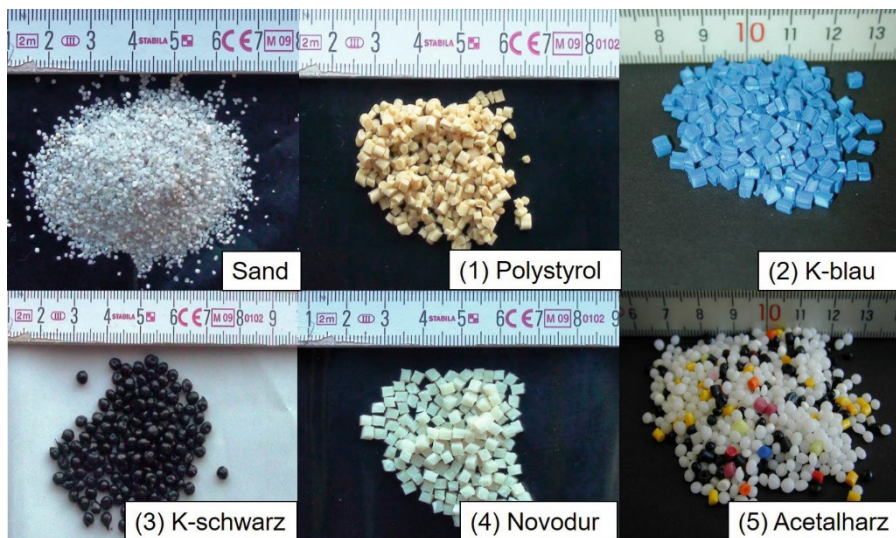


Bild 2: Fotografie des Sandes und der fünf Kunststoffgranulate

Dichte des Wassers ρ_w , den Korndurchmesser d , die kinematische Viskosität ν und die Erdbeschleunigung g :

$$D^* = \left(\frac{Re^{*2}}{Fr^*} \right)^{1/3} = \left(\frac{v_0^{*2} d^2}{\nu^2} \cdot \frac{\nu^2}{v_0^{*2} \rho' g d} \right)^{1/3} = \left(\frac{\rho' g d^3}{\nu^2} \right)^{1/3} = \left(\frac{\rho' g}{\nu^2} \right)^{1/3} d \quad (1)$$

Anzumerken ist, dass der Schüttwinkel φ des Sohlenmaterials und die Kornform nicht in der dimensionslosen Kennzahl D^* berücksichtigt sind. Da die Dichte des Fluids ρ_w sowie die Viskosität des Fluids ν und die Erdbeschleunigung g als konstante Größen in die wasserbaulichen Versuche eingehen, sind die Dichte des Feststoffes ρ sowie der Korndurchmesser d die beiden Größen, die üblicherweise bei der Auswahl der Modellsedimente variiert werden. Ein Sand und ein Kunststoffgranulat mit jeweils unterschiedlicher Dichte und Korngröße können somit einen gleichen sedimentologischen Durchmesser D^* ($D^*_{\text{Sand}} = D^*_{\text{Kunststoffgranulat}}$) aufweisen, wodurch nach Interpretation des Shields-Diagramms gleiche Eigenschaften zum Bewegungserhalten vorliegen sollten. Mit diesem Ansatz wurde das 1. Ähnlichkeitskriterium festgelegt. Der Index S steht für Sand, der Index K für Kunststoffgranulat, der Index r steht für Relation zwischen den beiden Sohlenmaterialien:

$$D_r^* = \frac{D_{\text{Sand}}^*}{D_{\text{Kunststoffgranulat}}^*} = \frac{\left(\frac{\rho_s \cdot g}{\nu^2}\right)^{1/3} \cdot d_s}{\left(\frac{\rho_k \cdot g}{\nu^2}\right)^{1/3} \cdot d_k} = \frac{\rho_s^{1/3} \cdot d_s}{\rho_k^{1/3} \cdot d_k} = \rho_r^{1/3} \cdot d_r = 1 \quad (2)$$

Tabelle 1: Kennzahlen des Sandes und der Kunststoffgranulate (Quelle: Ettmer)

Bezeichnung	d_{50} [mm]	Sieblinie [mm]	U $(d_{84}/d_{16})^{0,5}$	ρ [kg/m ³]	Kornform	D_{50}^* [1]	D^* [1]
Sand S40T	0,82	0,40-1,40	1,33	2 650	gerundet	rd. 19	rd. 9-33
(1) Polystyrol	2,06	1,56-2,87	1,19	1 058	Zylinder	rd. 15	rd. 12-22
(2) Gr. blau	2,50	Einkorn	1	1 050	Quader	rd. 18	rd. 18
(3) Gr. schw.	2,30	Einkorn	1	1 120	Ellipse	rd. 22	rd. 22
(4) Novodur	3,50	Einkorn	1	1 070	Quader	rd. 28	rd. 28
(5) Acetalharz	2,60	Einkorn	1	1 365	Ellipse	rd. 36	rd. 36

Anzumerken ist, dass die Variation der relativen Dichte ρ' und des Korndurchmessers d im Laboralltag praktischen Anwendungsgrenzen unterliegen. So kann die Dichte des Kunststoffgranulates nicht beliebig klein und der Durchmesser des Kunststoffgranulates nicht beliebig groß gewählt werden. Eine definierte Abgrenzung liegt jedoch bislang nicht vor; sie beruht auf den Erfahrungen des Modellierers. Im Allgemeinen werden die Dichten des Kunststoffgranulates nicht geringer als etwa 1 050 kg/m³ ausgewählt und der Korndurchmesser des Kunststoffgranulates liegt in der Versuchspraxis zwischen $d = 1,0$ mm und $d = 3,5$ mm.

Ausgehend davon, dass mit dem sedimentologischen Durchmesser D^* alle wesentlichen Materialkenngrößen und die Erdbeschleunigung in einer Kennzahl erfasst sind, war es das Ziel, für eine Sand-Sieblinie eine identische Kunststoffgranulat-Sieblinie mit D^* zu erzeugen. Die Sand-Sieblinie bestand aus einem industriell hergestellten, gewaschenen und gesiebten Sand mit eindeutiger Sieblinie und der Bezeichnung S40T. Die Korndurchmesser der Sieblinie lagen zwischen 0,40 mm bis 1,40 mm entsprechend einem sedimentologischen Durchmesser von $D^* = 9$ bis 33. Der Korndurchmesser d_{50} betrug 0,82 mm. Die Ungleichförmigkeit der Sand-Sieblinie betrug $U = 1,33$.

Für die Nachbildung der passenden Kunststoffgranulat-Sieblinie wurden fünf Kunststoffgranulate ausgewählt. Die Auswahl der Kunststoffgranulate erfolgte mit dem Ziel den Bereich $D^* = 9$ bis 33 der Sand-Sieblinie abzudecken. Aufgrund versuchspraktischer Erfahrungen mit Kunststoffgranulaten und Verfügbarkeiten wurde die Auswahl auf Kunststoffgranulate mit einem Korndurchmesser von $d_{50} = 2,06$ mm bis 3,50 mm und Dichten von $\rho = 1 050$ kg/m³ bis $\rho = 1 365$ kg/m³ gelegt. Damit wurde ein Bereich $D^* = 12$ bis 36 abgedeckt. Die abschließend ausgewählten Kunststoffgranulate waren zudem unterschiedlich gefärbt, um die Einzelkornfraktionen im Experiment unterscheiden zu können. Die Kornform der Kunststoffgranulate war zylindrisch, quaderförmig und elliptisch. Der Formfaktor $FF = c/(a \cdot b)^{0,5}$ (mit $a =$ längste Achse, $b =$ mittlere Achse und $c =$ kürzeste Achse) betrug $FF \approx 0,7$ und entsprach damit dem Formfaktor für natürliche Sedimente. Hinzuweisen ist darauf, dass in Vorversuchen auch ein Kunststoffgranulat mit $D^* = 9$ verwendet wurde, aber aufgrund der geringen Dichte in Kombination mit einem kleinen Korndurchmesser im praktischen Versuchsbetrieb nicht handhabbar war. Eine Zusammenstellung der Kennzahlen ist in **Tabelle 1** gegeben. Die kinematische Viskosität wurde mit $\nu = 1,14 \cdot 10^{-6}$ m²/s angesetzt. Eine Fotografie des Sandes und der fünf

Kunststoffgranulate ist in **Bild 2** dargestellt. Die Sand-Sieblinie und die Kunststoffgranulat-Sieblinie sind in **Bild 3** dargestellt.

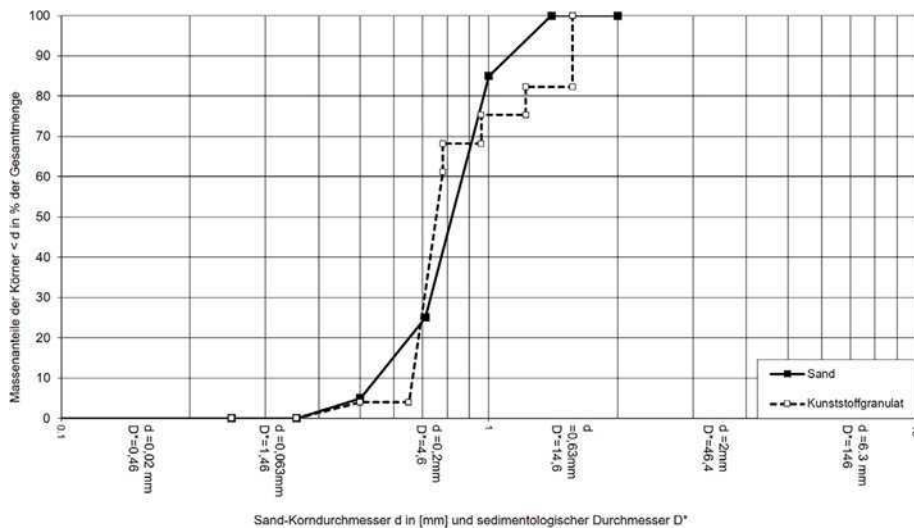


Bild 3: Sand-Sieblinie und Kunststoffgranulat-Sieblinie

Zu erkennen ist, dass die Sand-Sieblinie überwiegend aus gleitend abgestuften Korngemischen und die Kunststoffgranulat-Sieblinie überwiegend aus uniformen Einzelkornfraktionen aufgebaut war, so dass bei letzterer eine treppenstufige Anordnung der Kunststoffgranulat-Sieblinie entstand. Zwischengrößen, wie sie in der Sand-Sieblinie grundsätzlich vorliegen, fehlen oder liegen in vernachlässigbar kleinen Volumenanteilen vor. Deutlich wird, dass die Sieblinie des Sandes näherungsweise, aber nicht deckungsgleich nachgebildet werden konnte.

Ähnlichkeitskriterien 2: Morphodynamische Ähnlichkeit

Um eine Ähnlichkeit in den morphodynamischen Prozessen zu erzeugen, wurden in umfangreichen Voruntersuchungen die kritische Fließgeschwindigkeit v_{krit} und die Sinkgeschwindigkeit w des Sandes und Kunststoffgranulate bestimmt. Das dimensionslose Verhältnis v_{krit}/w dient als charakteristische Größe für die Beschreibung der Sprungweite von Sohlenmaterialien in der Strömung. Die kritische Fließgeschwindigkeit und die Sinkgeschwindigkeit wurden für eine Korngruppe von rd. 30 Einzelkörner bestimmt. Da die geplanten experimentellen Versuche - wie zumeist bei morphodynamischen Untersuchungen im Labor - im sog. hydraulischen Übergangsbereich stattfanden, wurde für die Ähnlichkeit der Kinematik im hydraulischen Übergangsbereich die dimensionslose kornbezogene Widerstandszahl X_g herangezogen (u. a. [2], [3]). Mit X_g kann im hydraulischen Übergangsbereich die Trägheit und die Zähigkeit in Versuchsbedingungen berücksichtigt werden und die

Tabelle 2: Kritische Fließgeschwindigkeit v_{krit} und Sinkgeschwindigkeit w sowie Kornbezogene Widerstandszahl X_g und Fließgeschwindigkeit v (Quelle: Ettmer)

Bezeichnung	D_{50}^* [μm]	v_{krit} [m/s]	w [m/s]	v_{krit}/w [1]	X_g [1]	v [m/s]
Sand-Sieblinie	rd. 19	0,42	0,14	3,00	13 bis 26	0,31 bis 0,71
Kunstst.-Sieblinie	rd. 19	-	0,033	3,03	12 bis 22	0,12 bis 0,22
(1) Polystyrol	rd. 15	0,095	0,031	3,06	-	-
(2) Granulat blau	rd. 18	0,094	0,026	3,67	-	-
(3) Granulat schwarz	rd. 22	0,102	0,035	2,93	-	-
(4) Novodur gelb	rd. 28	0,132	0,046	2,84	-	-
(5) Acetalharz	rd. 36	0,249	0,118	2,11	-	-



Bild 4: Fotografie der Versuchsrinne $b = 0,30$ m im Versuchsbetrieb



Bild 5: Einzelfractionen der Kunststoffgranulate in der Versuchsrinne nach dem Einfüllen

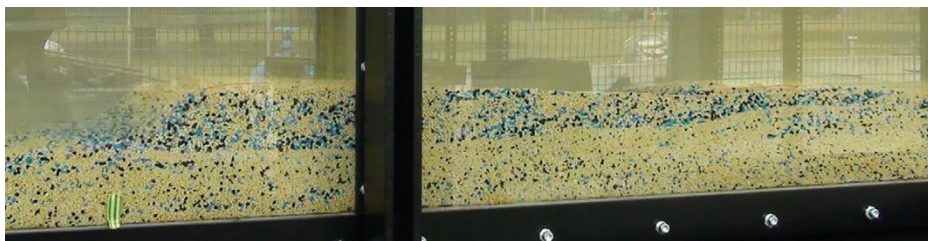


Bild 6: Vollständige Mischung und Transportkörperschicht über stabiler Unterschicht

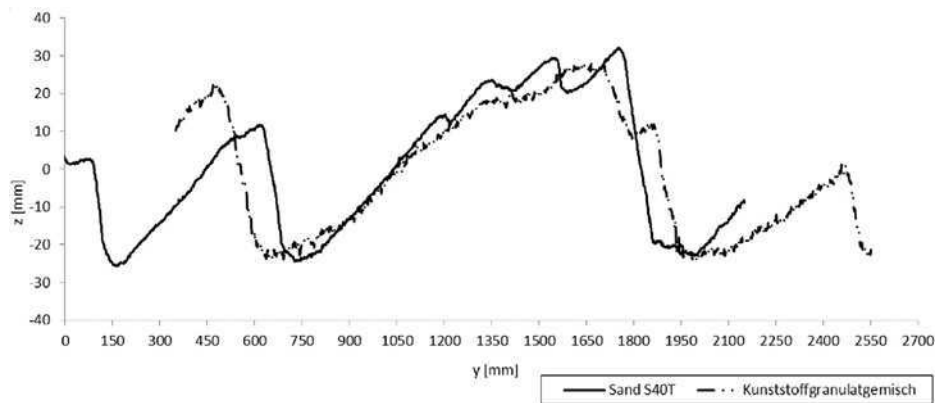


Bild 7: Exemplarischer Längsschnitt für eine Sand- und Kunststoffgranulat-Sohle

Fließgeschwindigkeit v für die Sand- und Kunststoffgranulat-Versuche kann abgeleitet werden [5].

X_g ist definiert zu:

$$X_g = \frac{Re_g}{Fr_g^2} = \frac{\frac{vd}{\nu}}{\frac{v^2}{\rho'gd}} = \frac{\rho'gd^2}{\nu v} \sim \frac{\text{widerstehende Kräfte}}{\text{Strömungsangriff}} \quad (3)$$

Die Fließgeschwindigkeit v für die Sand- und Kunststoffgranulat-Versuche wird wie folgt abgeleitet:

$$X_{g,r} = \frac{X_{g,s}}{X_{g,k}} = \frac{\left(\frac{\rho'_s g d_s^2}{\nu_s v_s^2}\right)}{\left(\frac{\rho'_k g d_k^2}{\nu_k v_k^2}\right)} \leftrightarrow = \frac{\rho'_s d_s^2 v_s^{-1}}{\rho'_k d_k^2 v_k^{-1}} = \rho'_r d_r^2 v_r^{-1} = 1 \quad (4)$$

Die Werte für v_{krit} , w sowie v und X_g sind **Tabelle 2** zusammengestellt. Das Verhältnis v_{krit}/w betrug für beide Sieblinien $v_{krit}/w = rd. 3$, so dass von einem ähnlichen Verhalten der Sohlenmaterialien in der Strömung ausgegangen werden konnte.

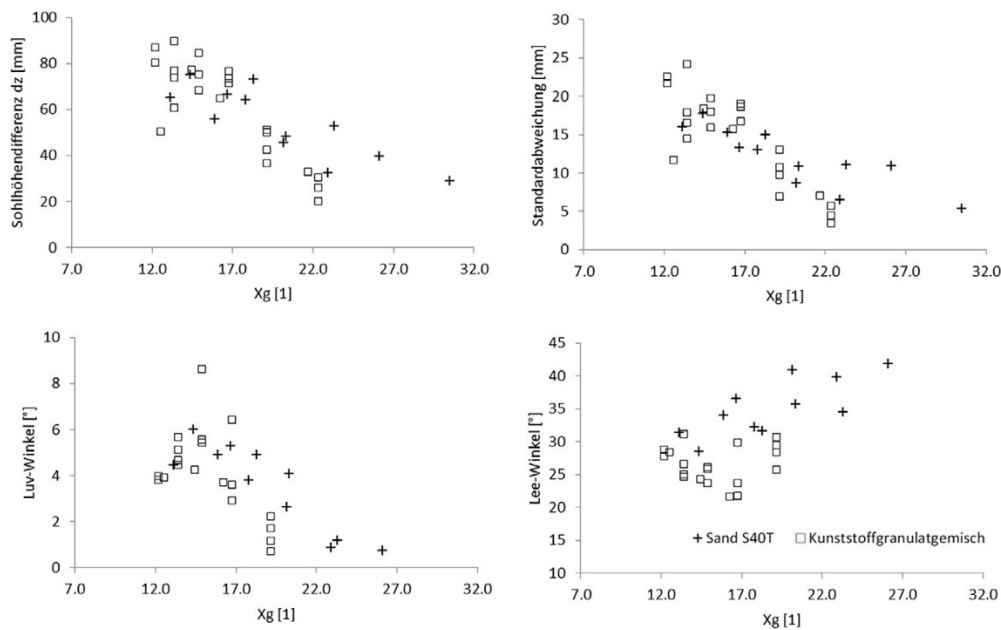


Bild 8: Sohlenhöhendifferenz dz , Standardabweichung σ_z und Luv- und Leewinkel der Dünen α° in Abhängigkeit zur kornbezogenen Widerstandszahl X_g

3 Experimentelle morphodynamische Versuche

Die experimentellen morphodynamischen Versuche wurden in der wasserbaulichen Versuchshalle der Hochschule Magdeburg in zwei hydraulischen Versuchsrinnen mit Geschiebekreislauf durchgeführt. Die Versuchsrinnen besaßen nutzbare Längen von 10 m und 20 m und Breiten von 0,30 m bzw. 60 cm. Die Geschiebekreisläufe bestanden aus einer Geschiebezuführung am Beginn der Versuchsrinnen und einer Geschieberückführung am Ende der Rinnen. **Bild 4** zeigt die Versuchsrinne $b = 0,30$ m im Versuchsbetrieb.

In die Versuchsrinne 1 wurden die Kunststoffgranulate und in die Versuchsrinne 2 der Sand eingebracht. Die Kunststoffgranulate wurden als Einzelkornfraktionen und nicht gemischt verwendet. **Bild 5** zeigt eine Fotografie der Einzelkornfraktionen der Kunststoffgranulate nach dem Einfüllen. Die Mischung der Kunststoffgranulate erfolgte durch den Versuchsbetrieb. **Bild 6** zeigt eine Fotografie der Kunststoffgranulate nach rd. acht Stunden Versuchsbetrieb. Die Einzelkornfraktionen waren gemischt und konnten durch ihre Farbe eindeutig voneinander abgegrenzt werden. Es zeigten sich z. T. Schichtungen, die zwischen einer Transportkörperschicht und einer stabilen Unterschicht zu erkennen waren. Die Sedimentsohlen im Sandversuch und im Kunststoffgranulatversuch wurden mit einem Laserscanner und einem Photogrammetrie-System vermessen, sobald ein morphologisches Gleichgewicht in den Versuchen vorlag. Die Vermessung erfolgte während des Versuchsbetriebes, so dass zeitlich fortlaufende Sohlenformationen von Dünen erfasst wurden.

4 Ergebnisse

Die Laserscans und die Photogrammetrieauswertungen wurden auf geometrische und morphodynamische Ähnlichkeiten zwischen der Sand-Sohle und der Kunststoffgranulat-Sohle ausgewertet. **Bild 7** zeigt exemplarisch einen Längsschnitt der Sohle für einen Sand-Versuch und für einen Kunststoffgranulat-Versuch. Deutlich wird, dass die Sohle aus Dünen besteht und für beide Versuche eine grundsätzliche geometrische Ähnlichkeit aufweist. Um die Ähnlichkeit quantifizieren zu können, wurden die Dünenhöhe z , die Standardabweichung der Sohlenhöhe σ_z sowie der Luv- und Leewinkel der Dünen α für die Sand-Versuche und die Kunststoffgranulat-Versuche für insgesamt 29 Versuche ausgewertet. So sind bspw. im dargestellten Längsschnitt die absoluten Dünenhöhen mit $z = \text{rd. } 31 \text{ mm}$ für die Sand-Sieblinie und mit $z = \text{rd. } 29 \text{ mm}$ für die Kunststoffgranulat-Sieblinie annähernd gleich.

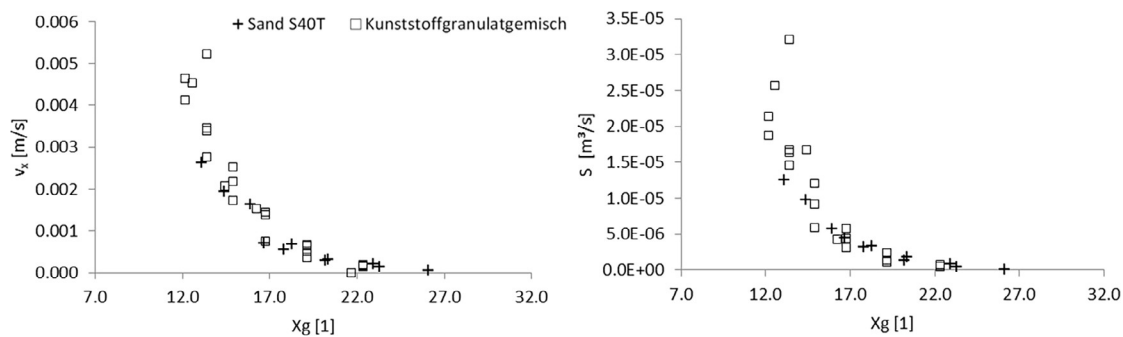


Bild 9: Fortschrittsgeschwindigkeit der Dünen v_x und Sedimenttransport S in Abhängigkeit zur kornbezogenen Widerstandszahl X_g

Neben diesen grundsätzlichen geometrischen Ähnlichkeiten ist jedoch auch zu erkennen, dass der Sand z. T. eine Tendenz aufwies, steilere Böschungen und damit etwas kürzere Dünen auszubilden als die Kunststoffgranulat-Mischung. Insgesamt zeigt sich jedoch, dass zwischen den Sand-Versuchen und den Kunststoffgranulat-Versuchen eine für morphologische Experimente signifikante Ähnlichkeit vorlag. **Bild 8** zeigt dazu die Ergebnisse aus den Sand- und Kunststoffgranulat-Versuchen für die Dünenhöhe, aufgetragen als Differenz dz zwischen Dünenmaxima und Dünenminima, die Standardabweichung σ_z sowie die Luv- und Leewinkel der Dünen α° .

Die morphodynamische Ähnlichkeit zwischen dem Sand- und dem Kunststoffgranulat-Versuch wurde über die Fortschrittsgeschwindigkeit der Dünen v_x und den Sedimenttransport S ausgewertet. **Bild 9** zeigt die Ergebnisse zur Fortschrittsgeschwindigkeit der Dünen v_x und den Sedimenttransport S . Deutlich wird, dass die Fortschrittsgeschwindigkeit der Dünen v_x für den Sand- und den Kunststoffgranulat-Versuch nahezu deckungsgleich sind und auch der Sedimenttransport für Sand- und Kunststoffgranulat-Versuche nahezu deckungsgleich verläuft. Hinzuweisen ist darauf, dass der Sedimenttransport als Volumentransport ausgewertet wurde.

Die Ergebnisse zeigen, dass in den Experimenten mit der Sand- und Kunststoffgranulat-Sieblinie signifikante geometrische und nahezu identische morphodynamische Ähnlichkeiten erzielt werden konnten. Die Ergebnisse zeigen auch, dass eine geometrische Ähnlichkeit nicht zwingend erforderlich ist, um eine morphodynamische Ähnlichkeit zu erzielen. Obwohl die Geometrie der

Sohlenformen nicht vollständig deckungsgleich zwischen den Sand-Versuchen und den Kunststoffgranulat-Versuchen hergestellt werden konnte, war die morphodynamische Ähnlichkeit zwischen Sand und Kunststoffgranulat nahezu deckungsgleich. Zur Absicherung der grundlegenden Versuchsergebnisse wurden weitere Versuche mit Sand-Sieblinien und Kunststoffgranulat-Mischungen durchgeführt, in denen die Sieblinie weitgestufter ausgeprägt war. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen und die Anwendung dieser Erkenntnisse werden in den Beiträgen in dieser Ausgabe 5/2021 der Wasser-Wirtschaft präsentiert. Die Ergebnisse zeigen neue Wege in der Modellierung von morphodynamischen Prozessen in experimentellen Untersuchungen auf.

Literatur

- [1] Dorer, H.: Ähnlichkeit bei flussbaulichen Modellen. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (1984), Nr. 54.
- [2] Ettmer, B.: Untersuchungen zu Kolkvorgängen hinter dem unterströmten Schütz. In: Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig (2006), Heft 155.
- [3] Ettmer, B.: Physikalische Modellierung von Kolkprozessen. In: BAW Mitteilungsblatt (2007), Nr. 90, S. 107-118.
- [4] Ettmer, B.; Orth, F.; Link, O.: Live-bed scour at bridge piers in a lightweight Polystyrene bed. In: Journal of Hydraulic Engineering 141 (2015), Nr. 9.
- [5] Ettmer, B.; Hentschel, B.; Orlik, S.: Geschiebetransport im gegenständlichen Modell: Neue Ansätze zur naturähnlichen Abbildung komplexer morphodynamischer Prozesse. In: BAW-Kolloquium zu Wasserbaulichen Herausforderungen in der Binnenschifffahrt, 26./27.10.2017, Karlsruhe.
- [6] García, H. G.: Sedimentation Engineering: Theories, Measurements, Modeling and Practice: Processes, Management, Modeling, and Practice. In: ASCE Manual and Reports on Engineering Practice (2008) No. 110.
- [7] Hughes, S. A.: Physical models and laboratory techniques in coastal engineering. World Scientific Publishing, 1993.
- [8] Kobus, H.: Anwendung der Dimensionsanalyse in der experimentellen Forschung des Bauingenieurwesens. In: Die Bautechnik (1974), Heft 3, S. 88-94.
- [9] Lee, S. O.; Sturm, T. W.: Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour. In: Journal of Hydraulic Engineering 135 (2009), Nr. 10, S. 793-802.

- [10] Link, O.; Henríquez, S.; Ettmer, B.: Physical scale modelling of scour around bridge piers. In: Journal of Hydraulic Research 57 (2019), Nr. 2, S. 227-237.
- [11] Pizarro, A.; Ettmer, B.; Manfreda, S.; Rojas, A.; Link, O.: Dimensionless, effective flow work for estimation of pier scour caused by flood waves. In: Journal of Hydraulic Engineering 143 (2017), Nr. 7.
- [12] Shen, H. W.: Movable bed physical models. In: NATO ASI series. Series C: Mathematical and physical sciences (1990), no. 312.
- [13] Zanke, U.: Über die Naturähnlichkeit von Geschiebeversuchen bei einer Gewässersohle mit Transportkörpern. In: Mitteilungen des Franzius-Instituts der TU Hannover (1976), Heft 44, S. 290-324.

New way in morphodynamical experiments by using sieve curves with lightweight synthetic pellets

Morphodynamic experiments are still essential for the prediction and prognosis of morphodynamic processes. But, scaling of sediment characteristics from nature to laboratory experiment are restricted and scaling laws recently propose a scaling of nature sieve curve to a uniform lightweight synthetic pellet. Thus, sieve curve properties from nature will be neglected. A research cooperation between Federal Waterways Engineering and Research Institute, Karlsruhe and University of Applied Sciences Magdeburg follow the question of scaling nature sand sieve curves to artificial lightweight sieve curves. Therefore, synthetic pellets were mixed to an artificial light-weight sieve curve. Experimental results show significant geometric similarity of dunes and morphodynamic similarity for sediment transport.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Bernd Ettmer
Hochschule Magdeburg -Stendal, Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit
Breitscheidstraße 2, 39114 Magdeburg
E-Mail: bernd.ettmer@h2.de

Dipl.-Ing. Bernd Hentschel
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe
E-Mail: bernd.hentschel@baw.de

Prof. Dr.-Ing. Oscar Link
Universidad de Concepción, Department of Civil Engineering
Barrio Universitario S/Nº, P. O. Box 160 – C, Concepción, Chile
E-Mail: olink@udec.cl