

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Author's Postprint

Hüsener, Thorsten; Hesse, Daniel

Experimentelle Untersuchungen zu Sedimentablagerungen in einer Flusskrümmung am Mittelrhein

Wasserwirtschaft

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/110799>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Hüsener, Thorsten; Hesse, Daniel (2021): Experimentelle Untersuchungen zu Sedimentablagerungen in einer Flusskrümmung am Mittelrhein. In: Wasserwirtschaft 111 (5). S. 23-30.

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.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

Erstveröffentlichung in Wasserwirtschaft Heft 5 (2021), S. 23-30.

Experimentelle Untersuchungen zu Sedimentablagerungen in einer Flusskrümmung am Mittelrhein

Thorsten Hüsener^a, Daniel Hesse^b

^a Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

^b Hochschule Magdeburg-Stendal; Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit

Die Bundesanstalt für Wasserbau untersucht im großmaßstäblichen Modellversuch eine für die Binnenschifffahrt herausfordernde Krümmung im Mittelrhein bei Oberwesel. In der Flusskrümmung wird die Schifffahrt durch Sedimentanlandungen entlang einer Kiesbank am Innenufer erschwert. Diese Anlandungen werden derzeit durch Baggerung wiederkehrend entfernt. Flussbauliche Maßnahmen sollen helfen, den Unterhaltungsaufwand zu vermindern. Eine besondere Herausforderung bei der Modellierung lag darin, das Natursediment auf ein geeignetes Modellsediment zu übertragen. Als Modellsedimente wurden verschiedene Kunststoffgranulate unterschiedlicher Dichte als Granulatmischungen eingesetzt.

Kompakt:

- Erste Erfahrungen in einem großmaßstäblichen Modell mit Mischungen verschiedener Kunststoffgranulate unterschiedlicher Dichte zur Nachbildung weitgestufter Flusssedimente legen nahe, dass selbst sehr komplexe hydraulisch-morphologische Situationen mit großer Naturähnlichkeit simuliert werden können.
- Voraussetzung ist eine sehr sorgfältige Modelldimensionierung und vorherige Erprobung von Geschiebersatzmaterialien.

1 Einleitung

Das Verkehrsinfrastrukturprojekt „Abladeoptimierung der Fahrrinnen am Mittelrhein“ [1] hat zum Ziel, die Fahrrinntiefe im Rhein zwischen den Städten Mainz und St. Goar an die ober- und unterstrom angrenzenden Abschnitte anzugleichen. Dazu sollen insgesamt sechs Tiefenengstellen beseitigt werden. Eine dieser Engstellen befindet sich an der Kiesbank „Jungferngrund“ gegenüber der Ortschaft Oberwesel, etwa bei Rhein-km 550. In diesem Bereich weist der Rhein eine 90°-Krümmung auf, in der die Fahrrinne am Außenufer durch die Felseninsel Tauber Werth und am Innenufer durch umfangreiche Sedimentanlandungen der Kiesbank Jungferngrund eingeengt ist. Die Sedimentanlandung am Innenufer weist eine Breite von ca. 200 m auf und reicht bis in den Bereich der Fahrrinne hinein, wodurch die Schifffahrt beeinträchtigt wird. Die Anlandungen bestehen im Wesentlichen aus Sand und Kies und weisen eine weitgestufte Sieblinie auf. Bild 1 oben zeigt eine Schrägbildaufnahme der Rheinkrümmung bei Niedrigwasser.

Um die morphologischen Verhältnisse in der Flusskrümmung zu untersuchen und geeignete flussbauliche Maßnahmen zu entwickeln, führt die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) im Auftrag des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Rhein u. a. experimentelle Untersuchungen in einem großmaßstäblichen Modell durch [2]. Bild 1 unten zeigt das Modell mit einem Längenmaßstab von 1:60 und einem Höhenmaßstab von 1:50.



Bild 1: Oben: Schrägbildaufnahme des Rheins bei Oberwesel (Datum 23.10.2018), unten: großmaßstäbliches Modell Jungferngrund (ML 1:60 / MH 1:50). (Quelle: oben: WSA Rhein, unten: BAW)

Um die morphologischen Verhältnisse der Flusskrümmung im Modell möglichst genau nachzubilden, musste u. a. die Topografie der Flusssohle möglichst exakt abgebildet sowie die weitgestufte Sieblinie des Natursediments auf ein geeignetes Modellsediment übertragen werden. Eine maßstäbliche Verkleinerung der Natursedimente war auf Grund der vorhandenen Feinkornfraktionen nicht möglich, da diese teilweise bis in den Bereich bindiger Sedimente verkleinert würden und damit Adhäsions- sowie Kohäsionskräften unterlägen. Stattdessen wurde die Natursieblinie auf eine Kunststoffgranulatsieblinie übertragen [3].

Die Wahl und Erprobung eines geeigneten Modellsedimentes wurden von der Hochschule Magdeburg in Kooperation mit der BAW mit experimentellen Grundlagenversuchen untersucht. Da bisher wenig Erfahrung mit Kunststoffgranulat als Modellsediment für weitgestufte Natursedimente vorliegt, werden im Folgenden die Grundlagenuntersuchungen an der Hochschule Magdeburg und ausgewählte experimentelle Untersuchungen im großmaßstäblichen Modell an der BAW vorgestellt. Ziel dieses Artikels ist es, die Anwendbarkeit von Kunststoffgranulat-Mischungen mit unterschiedlicher Dichte zur Nachbildung weitgestufter Natursedimente in Modellversuchen zu verdeutlichen.

2 Grundlagenuntersuchungen an der Hochschule Magdeburg

Wesentlich für den großmaßstäblichen Modellversuch war es, das Natursediment über eine geeignete Skalierung auf ein Laborsediment zu übertragen. In einem ersten Schritt wurde dazu das Natursediment (Baggerproben am Jungferngrund) mit den charakteristischen Korngrößen $d_{16} = 2 \text{ mm}$, $d_{50} = 17 \text{ mm}$ und $d_{84} = 47 \text{ mm}$ und einer Ungleichförmigkeit $U = (d_{84}/d_{16})^{0,5} = 4,8$ auf einen Laborsand übertragen [4]. Die Sieblinie des Laborsandes entsprach damit dem geometrisch verkleinerten Natursediment und diente als Referenzsediment. Die Korndurchmesser des Sandes betragen zwischen 0,17 mm und 1,15 mm und entsprachen einem sedimentologischen Durchmesser von $D^* = 4$ bis 27. In einem zweiten Schritt wurde der Sand mit dem D^* -Ähnlichkeitskriterium und X_g - bzw. v_{krit}/w -Ähnlichkeitskriterium auf verschiedene Kunststoffgranulate übertragen [3], [5]. Ziel war es, den Sand mit $D^* = 4$ bis 27 bestmöglich auf das Kunststoffgranulat zu übertragen. Auf Grund von Erfahrungswerten und Verfügbarkeiten beim Kunststoffgranulat erfolgte die Auswahl für drei Kunststoffgranulatfraktionen, einer Feinfraktion (Polystyrol), einer Mittelfraktion (Polycarbonat) und einer Grobfraktion (Ultradur). Diese deckten den Bereich zwischen $D^* = 12$ bis 34 der Sand-Sieblinie ab. Der Volumenanteil der Einzelfraktionen an den Kunststoffgranulaten betrug je ein Drittel. Die wesentlichen Kennzahlen der Sand- und der Kunststoffgranulate sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Fotografien des Sandes und der Kunststoffgranulate sind in Bild 2 dargestellt.

Tabelle 1: Kennzahlen des Modellsandes und der Kunststoffgranulate (Quelle: Hesse)

| Bezeichnung: | d_{50} [mm] | Sieblinie d_{16} - d_{84} [mm] | U $(d_{84}/d_{16})^{0,5}$ | D^* [1] | Dichte [kg/m ³] | Kornform |
|---------------------------------|------------------|---------------------------------------|------------------------------|--------------|--------------------------------|-----------|
| (1) Sand | 0,62 | 0,17-1,15 | 2,5 | 4-27 | 2 650 | gerundet |
| (2) Kunststoffgranulate: | | | | | | |
| - Feinfraktion (Polystyrol) | 2,1 | 1,8-2,2 | 1,1 | rd. 12-22 | 1 058 | Zylinder |
| - Mittelfraktion (Polycarbonat) | 2,0 | Einkorn | 1 | rd. 23 | 1 200 | Zylinder |
| - Grobfraktion (Ultradur) | 2,6 | Einkorn | 1 | rd. 34 | 1 306 | Ellipsoid |

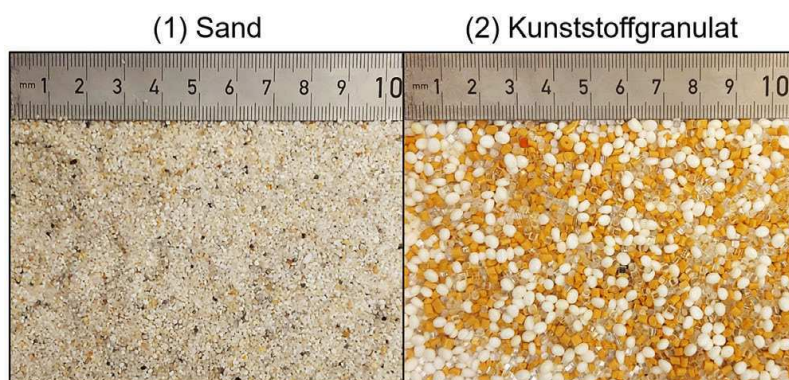


Bild 2: Fotografie des Sandes und der Kunststoffgranulate (Feinfraktion: gelb, Mittelfraktion: transparent, Grobfraktion: weiß). (Quelle: Hesse)

Die Sand-Sieblinie (Versuch 1) und die Kunststoffgranulat-Sieblinie (Versuch 2) wurden in einem Flächenmodell mit einer Flusskrümmung im Außengelände der wasserbaulichen Versuchshalle an der Hochschule Magdeburg experimentell untersucht. Die geometrischen Abmessungen des Flächenmodells bildeten den Rhein am Jungferngrund zwischen etwa Rhein-km 550 bis 552 abstrahiert im

Maßstab $L_r = 1:350$ und $H_r = 1:50$ nach. Das Modell wurde im Labor zudem auf Grund der räumlichen Gegebenheiten spiegelverkehrt aufgebaut. Die Fließstrecke im Modell betrug rd. 8 m, die Breite im Zulauf zur Flusskrümmung betrug rd. 0,6 m. Der Wasserstand im Modell wurde über eine steuerbare Wehrklappe geregelt. Die Felseninsel im Bereich des Außenufers der Flusskrümmung wurde idealisiert aus Steinen nachgebildet. Bild 3 links zeigt eine Fotografie des Modells.

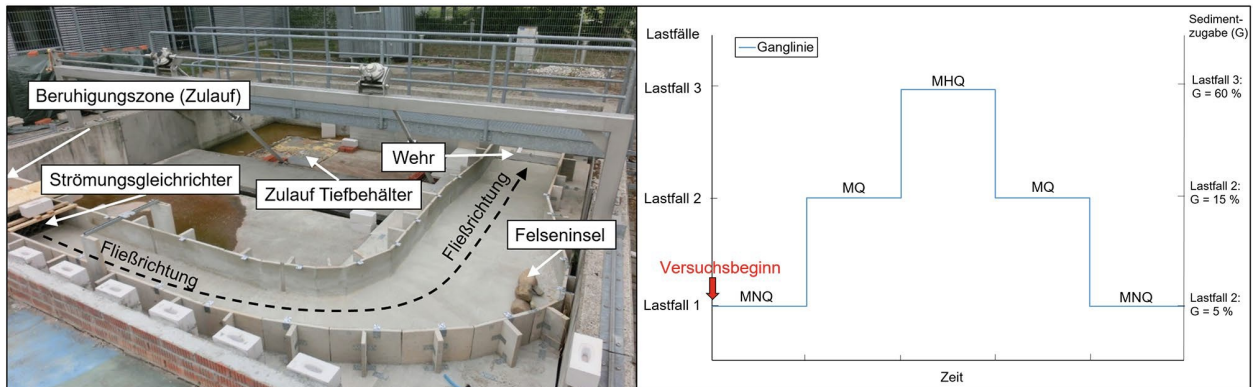


Bild 3: Links: Fotoaufnahme des Flächenmodells, rechts: Abflussganglinie $Q = f(t)$. (Quelle: Hesse)

Als hydraulische Randbedingungen wurden die Abflüsse vom Pegel Kaub bei Rhein-km 546,3 verwendet. Die maßgeblichen Abflüsse (Lastfälle) entsprachen dem Abflussbereich vom mittleren Niedrigwasser (MNQ) bis zum mittleren Hochwasser (MHQ). Die Versuche wurden instationär mit der Abflussganglinie in Bild 3 rechts durchgeführt. Die Sedimentzugabe erfolgte abflussabhängig im Zulauf zum Modell. Der Abfluss wurde mit einem induktiven Durchflussmessgerät (IDM) gemessen. Die Wasserstände wurden mit Stechpegeln und die Fließgeschwindigkeiten mit Kleinst-Messflügeln kontrolliert. Die sedimentologischen Verhältnisse im Bereich der Flusskrümmung wurden durch Foto- bzw. Videoaufnahmen dokumentiert und im trockenen Zustand photogrammetrisch vermessen.

Das zugegebene Sediment wurde mit der Strömung in den Bereich der Flusskrümmung transportiert. Ein Teil davon lagerte sich am Innenufer in der Flusskrümmung ab, der Rest wurde durchtransportiert. Bild 4 oben zeigt eine Fotografie der Sedimentablagerungen aus dem Sandversuch (links) und dem Kunststoffgranulatversuch (rechts). Zu erkennen ist, dass sich in beiden Versuchen am Innenufer der Flusskrümmung Sedimentablagerungen ausbildeten. Deutlich wird, dass die Sedimentablagerungen grundsätzlich eine geometrisch ähnliche Form aufwiesen. Beim Versuch mit dem Kunststoffgranulat sind zudem die einzelnen Granulatfraktionen durch ihre unterschiedlichen Farben gut zu erkennen. Die Grob- (weiß) und Mittelfraktionen (transparent) waren im Wesentlichen zur Flussmitte hin abgelagert, während sich die Feinfraktion (gelb) hauptsächlich im Bereich der linken Seitenwand abgelagert hatte.

Bild 4 unten zeigt zudem exemplarisch ein Querprofil durch die Sedimentablagerungen auf Höhe der Felseninsel. Deutlich wird, dass für beide Sedimentablagerungen eine ähnliche Höhe, Breite und Querschnittsfläche gemessen wurde. Lediglich im Bereich der linken Seitenwand waren die Granulatablagerungen tendenziell höher als die Sandablagerungen. Insgesamt zeigt sich damit, dass

zwischen dem Sandversuch und Granulatversuch eine für morphologische Experimente signifikante Ähnlichkeit vorlag.

3 Großmaßstäblicher Modellversuch an der BAW

Modelldimensionierung und Aufbau

Der Untersuchungsbereich stellt hydraulisch-morphologisch eine besondere Komplexität dar, die sich aus der Sekundärströmung der Flusskrümmung, der stark strukturierten Felssohle, der Transportvorgänge über Fels und dem Vorhandensein sehr heterogener Sedimente von Feinsand bis Grobkies sowie Steinen resultiert und bei der Dimensionierung des Modells zu berücksichtigen war. Die Modelldimensionen wurden aus den Naturrandbedingungen (Abfluss, Gefälle, mittleren Tiefen, mittleren Fließgeschwindigkeiten, charakteristischen Korngrößen und Materialeigenschaften) sowie dem zur Verfügung stehenden Laborplatz und der Laborinfrastruktur abgeleitet. Grundlegend handelt es sich bei dem Modell um ein hydraulisch langes Froude-Modell mit teilbeweglicher Sohle [6]. Aus den Randbedingungen ergab sich ein Maßstab der Länge von 1:60 und ein Maßstab der Höhe von 1:50. Die Gesamtlänge des Modells betrug rd. 73 m. Dieses entspricht einer Fließstrecke in der Natur von rd. 4,4 km.

Die Auswahl der Modellsedimente für den großmaßstäblichen Modellversuch erfolgte in Anlehnung an die gewählten Kunststoffgranulate in den Grundlagenuntersuchungen der Hochschule Magdeburg (Kap. 2). Da die dort genannten Kunststoffgranulate nicht in ausreichender Menge verfügbar waren, wurden diese teilweise durch Kunststoffgranulate mit ähnlichen Eigenschaften substituiert. Eine Übersicht über die verwendeten Kunststoffgranulate ist in Tabelle 2 gegeben. Für die Modellplanung wurden zusätzlich zu den in Kap. 2 genannten Ansätzen die Einzelfraktionen der Modell- und Natursedimente in das Shields-Diagramm Bild 5 übertragen. Dieses stellt mithilfe der dimensionslosen Froude-Zahl des Einzelkorns Fr^* in Gl. (1) und der dimensionslosen Reynolds-Zahl des Einzelkorns Re^* in Gl. (2) die Transportcharakteristik der Kategorien „keine Bewegung“, „Riffel-/bzw. Dünentransport“ oder „Suspensionstransport“ dar. Die beiden Parameter sind wie folgt definiert:

$$Fr^* = \frac{h \cdot I_E}{d \cdot (\rho_s - 1)} \quad (1)$$

$$Re^* = \frac{(g \cdot h \cdot I_E)^{0,5}}{\nu} \cdot d \quad (2)$$

h Wassertiefe [m]

I_E Energiegefälle [-]

d Korndurchmesser [m]

ρ_s Dichte (Feststoff) [t/m^3]

ν kinematische Viskosität [m^2/s]

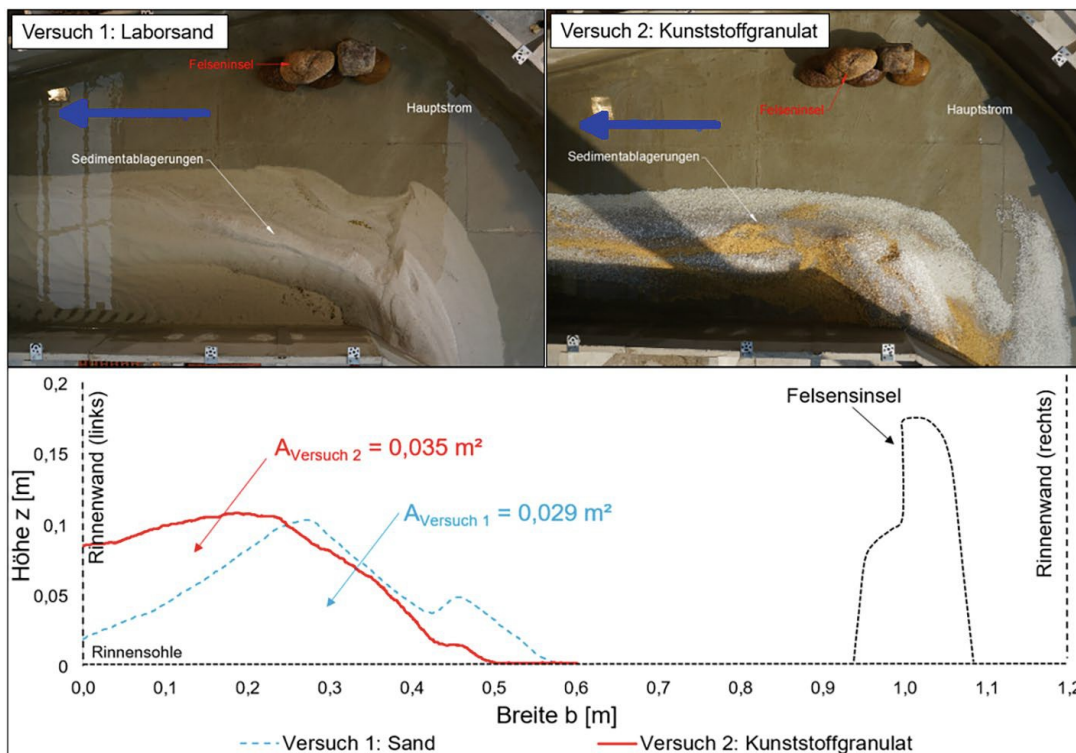


Bild 4: Oben: Fotoaufnahme der Sedimentablagerungen mit Sand (Versuch 1) und Kunststoffgranulat (Versuch 2), unten: Querprofil der Sedimentablagerungen auf Höhe der Felseninsel (Blick in Fließrichtung). (Quelle: Hesse)

Die charakteristischen Korngrößen wurden für die Abflussereignisse NQ, MQ und HQ dargestellt. Beim Modellsediment erhält man aufgrund der Fließtiefe naturgemäß auf der Abszisse (Re^*) kleinere Werte. Variabel bei den Modellsedimenten sind die Parameter Korndurchmesser und Materialdichte.

Da die felsige Flusssohle eine komplexe Struktur aus Klüften und Rinnen aufweist, die neben der Sekundärströmung einen Einfluss auf den Transportpfad der Sedimente hat, war eine geometrisch exakte Abbildung dieser Strukturen im Modell notwendig. Hierzu wurde eine Kombination aus CNC-Fräs- und Betongussverfahren angewendet. Die Bauweise der Gussblöcke und der Randbereiche, die in Profilbauweise erfolgte, sind in Bild 6 links dargestellt. Dieses Verfahren wurde für den zentralen Krümmungsbereich des Modells angewendet, der Ein- und Auslauf wurde in klassischer Profilbauweise realisiert.

Für die reproduzierbare Herstellung der Kiesbank-Topografie wurden lasergeschnittene Stahlprofile eingesetzt, die auf der Koffersohle auf Stahlwinkeln mit präzisiertem Höhenbezug aufliegen, wie Bild 6 rechts zeigt. Die Bleche wurden zur Versuchsvorbereitung durch den Granulatkörper hindurch bis auf die Stahlwinkeln getrieben. So platziert dienten diese als Abziehschablone für die Topografieherstellung. Vor dem Versuchsbeginn wurden die Bleche aus dem Granulatkörper herausgezogen.

Für die Mess- und Steuerungstechnik des Modells wurden 3 induktive Durchflussmesser und Plattenschieber (DN 100, DN 200 und DN 300) für die Abflussregelung, eine regelbare Wehrklappe zur

Steuerung des Wasserspiegels, 12 Ultraschall-Pegel sowie zwei gravimetrisch arbeitende Geschiebedosierer eingesetzt.

Zur Messung und Dokumentation der Versuchsdurchführung wurden ein Laserscanner, ADV-Messsonden (Fließgeschwindigkeit) sowie Spiegelreflexkameras verwendet. Letztere wurden für die Langzeitdokumentation (Zeitrafferfilme über den Gesamtversuch), Fotodokumentation nach dem Versuch (Orthophotos der Kiesbank) und für die photogrammetrische Kontrolle des Mischungsverhältnisses der Granulate bei der Versuchsvorbereitung (initiale Topografieherstellung von Kieszunge, Bild 7 links, und Kiesbank) eingesetzt [7]. Im zentralen Krümmungsbereich des Modells kam zudem ein photogrammetrisches 3-Kamera-Messsystem ([8], [9]) zur Messung der Topografie der Modell- und Wasseroberfläche sowie der Oberflächengeschwindigkeit zum Einsatz.

Tabelle 2: Kennzahlen der Kunststoffgranulate im großmaßstäblichen Modell (Quelle: BAW)

| Bezeichnung: | d_{50} [mm] | Sieblinie d_{16} - d_{84} [mm] | U $(d_{84}/d_{16})^{0,5}$ | Dichte [kg/m ³] | Farbe | Kornform |
|-------------------------------|---------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------|-----------|
| Feinfraktion (Polystyrol) | 2,1 | 1,8-2,2 | 1,11 | 1 055 | Gelb | Zylinder |
| Mittelfraktion (Polycarbonat) | 2,4 | 2,3-2,6 | 1,06 | 1 200 | Rot | Zylinder |
| Grobfraktion (PBT, Ultradur) | 3,0 | 2,5-3,3 | 1,15 | 1 310 | Weiß | Ellipsoid |

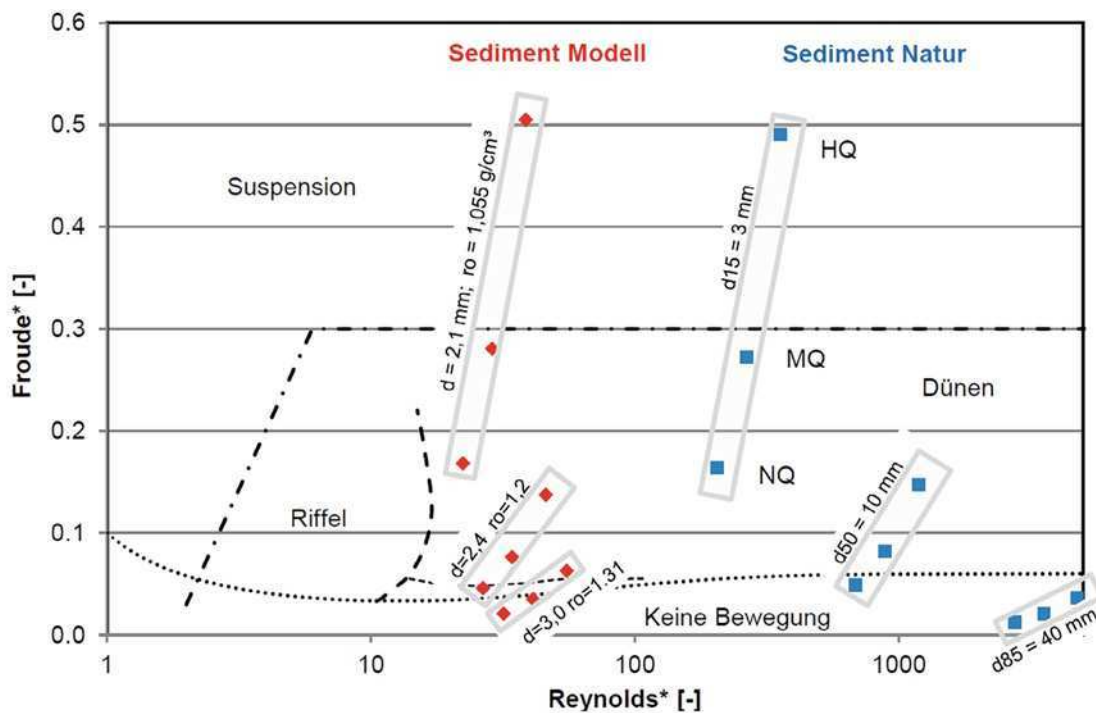


Bild 5: Modifiziertes Shields-Diagramm mit Angaben zu Natur- und Modellsedimenten bei verschiedenen hydrologischen Bedingungen. (Quelle: BAW)

3.2 Naturähnlichkeit im BAW-Modell

Das Modell wurde in drei Etappen kalibriert. In der ersten Etappe wurde das Modell hydraulisch kalibriert. Dazu wurden Wasserspiegelfixierungen aus Naturmessungen für unterschiedliche Abflusszustände mit Pegelmessungen im Modell verglichen. Auf Basis von ADCP-Messungen aus der

Natur und ADV-Messungen im Modell wurde eine Validierung durch den Vergleich der Strömungsverteilung vorgenommen

Morphologisch-stationäre Tracerversuche mit unbeweglicher Kiesbank Jungferngrund

Als Zielgröße für die morphologisch-stationäre Kalibrierung dienten die Sedimentanlandungen, die regelmäßig in der Fahrrinne auftreten. Diese Anlandungen entlang der Kiesbank Jungferngrund müssen ca. alle zwei Jahre durch Baggerungen entfernt werden. Lage und Entnahmehöhe sind durch das Unterhaltungsamt gut dokumentiert und dienen als Kalibrierbasis. Dargestellt sind diese Anlandungen in Bild 9 oben (Bezeichnung Anlandungsbereich) als rot-weißes Band aus Kunststoffgranulat, welches nach einem Versuch im entwässerten Modell verblieb und topografisch vermessen und quantifiziert wurde. Als veränderliche Stellschrauben zur Kalibrierung wurden der Ort der Granulat-zugabe, die Menge des zugegebenen Granulates, das Mischungsverhältnis der Granulate und die Dauer des Versuchs verwendet. Die Sedimentzugabe wurde auf der morphologisch aktiven Kieszunge oberstrom der Kiesbank platziert. In Bild 7 links ist der einfache Granulatdosierer dargestellt, wie er für den stationären Betrieb eingesetzt wurde.

Außerdem wurden zur weiteren Kalibrierung bzw. Validierung phänomenologische Beobachtungen herangezogen. Sohlenabpflasterungen sind beispielsweise an verschiedenen Probestellen gut durch Beprobungen mit einem Taucherglockenschiff dokumentiert. Ein Beispiel für die o. g. Kieszunge bei Rhein-km 550,0 ist in Bild 8 links dargestellt und zeigt einen Querschnitt der Kieszunge nach einem Versuch, bei der die Deckschicht aus weißem Granulat gebildet ist, welches das Grobkorn darstellt. Darunter findet sich eine Schicht aus überwiegend rotem Granulat, welches das Mittelkorn darstellt.



Bild 6: Links: Modellaufbau, Betongussblöcke und Randbereiche in Profilbauweise, rechts: Herstellung des Kiesbank-Koffers mit herausnehmbaren Blechprofilen für variable Nutzungen. (Quelle: BAW)

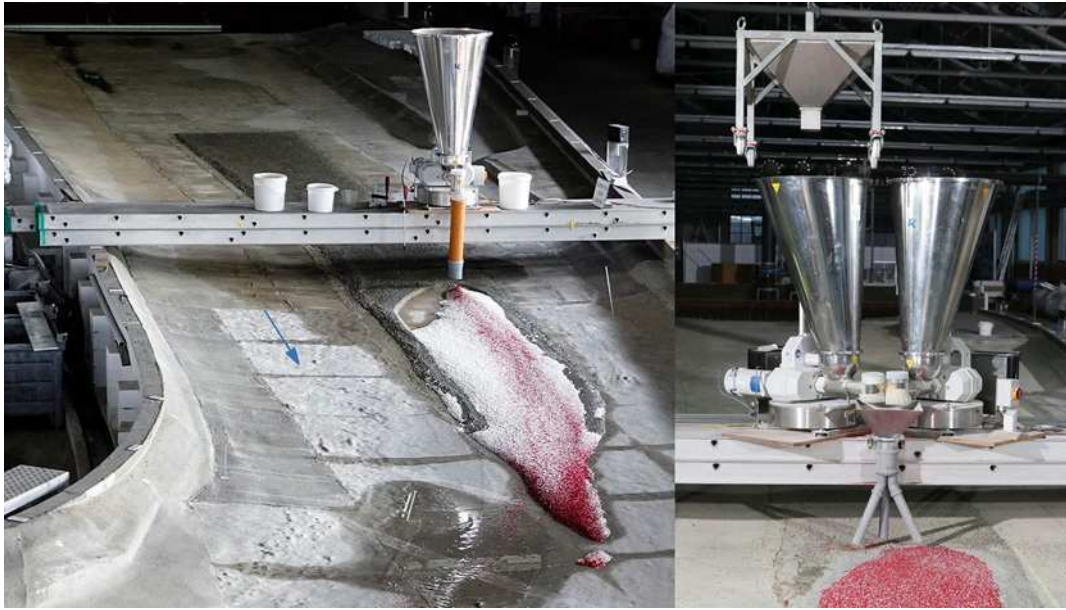


Bild 7: Links: Geschiebedosierer über Kieszunge im stationären Modellbetrieb, rechts: zwei Dosierer mit Verteiltrichter für veränderliche Granulatmischungen bei instationärem Modellbetrieb. (Quelle: BAW)

Das Phänomen der Sedimentsortierung konnte am unterstromigen Ende der Kiesbank Jungferngrund beobachtet werden. In Bild 8 rechts ist eine entsprechende Beobachtung im Modell dargestellt. Die grobe Fraktion (weiß) fand sich zur Strommitte hin, in Richtung des Ufers lagerte sich überwiegend feines Material (gelb) ab, dazwischen lag gut getrennt die Mittelfraktion (rot). Die Probenahmen mit dem Taucherglockenschiff wiesen eine sehr ähnliche, dicht nebeneinander liegende Sortierung der Sedimente auf.

Morphologisch-hydrologische Kalibrierung mit vollbeweglicher Kiesbank Jungferngrund

Die morphologisch-hydrologische Kalibrierung mit vollbeweglicher Kiesbank Jungferngrund hatte die Anwendung einer repräsentativen instationären Ganglinie zum Ziel, die den überwiegenden Teil des hydraulisch-morphologischen Geschehens am Jungferngrund etwa zwischen MNQ bis MHQ über einen Zeitraum von ca. 2 Jahren abbildete. Hierbei spielte die Beobachtung der morphologischen Prozesse sowohl in den Anlandungsbereichen der Fahrrinne als auch auf der gesamten Ausdehnung der Kiesbank Jungferngrund eine wesentliche Rolle, da diese als ökologisch wertvolle und damit schützenswerte Fläche eingestuft ist. Die wesentlichen Stellschrauben zur Kalibrierung waren die instationäre Abfluss- und Wasserstandsregelung durch Steuerfahrpläne von Zufluss und Wehrklappe mit entsprechendem zeitlichem Offset zwischen oberer und unterer Modell-Randbedingung. Weiterhin wurde ein abflussabhängiges Mischungsverhältnis und die Zugabemenge des Granulates durch Einsatz eines zweiten Dosiergerätes realisiert (Bild 7 rechts). Ort und Art der Zugabe sowie lokaler Verteilung wurden ebenfalls feinabgestimmt. Die Versuchsdauer von 25 Stunden, in der eine zweijährige Ganglinie mit insgesamt sechs Hochwasserereignissen durchlaufen wurde, hat sich als zweckmäßig erwiesen, um ausreichend morphologisches Geschehen auf der Kiesbank zu erzeugen.

Die oberstrom der Kiesbank Jungferngrund gelegene Kieszunge konnte als Sedimentdepot und als morphologischer Indikator betrachtet werden. Die morphologische Entwicklung der Kieszunge ist durch regelmäßige Peilungen gut dokumentiert. Auf dieser Kieszunge findet in der Natur der Geschiebetransport auf einem schmalen Band konzentriert statt, wie durch die Geschiebemesstelle Oberwesel gut belegt ist. Im Modell fand die Granulatzugabe auf dieser Kieszunge statt. Diese reagierte empfindlich auf die Menge und Zusammensetzung der Zugabe. Die Stabilität der Kieszunge konnte damit als Indikator für eine geeignete Zugabe-Strategie angesehen werden. Bei zu geringer Zugabemenge oder einer zu feinkörnigen Granulatomischung erodierte die Kieszunge oder löste sich nahezu auf, bei zu großer oder zu grober Zugabemenge konnte das Material nicht abtransportiert werden und die Kieszunge höhte sich im Vergleich zur Natur zu stark auf. Außerdem wurde eine Überprüfung des Geschehens auf der Kiesbank Jungferngrund durchgeführt. Da es hier lokal am Ufer außerhalb der Fahrrinne nur wenige Linienpeilungen und nur eine Flächenpeilung gab, ist das detaillierte morphologische Geschehen über die Zeit nur unzureichend bekannt. Es konnte lediglich ein langfristiger Trend über Dekaden mit einem stetigen Zuwachs an Volumen festgestellt werden (ca. 2 m Höhenwachstum in 40 Jahren). Somit konnte das im Modell über einen Zeitraum von zwei Jahren beobachtete morphologische Geschehen nur dahingehend überprüft werden, ob es sich innerhalb der Grenzen der wenigen Naturbeobachtungen bewegt.

In Bild 9 oben sind vier wesentliche Bereiche für die Kalibrierung, aber auch für das Prozessverständnis dargestellt.

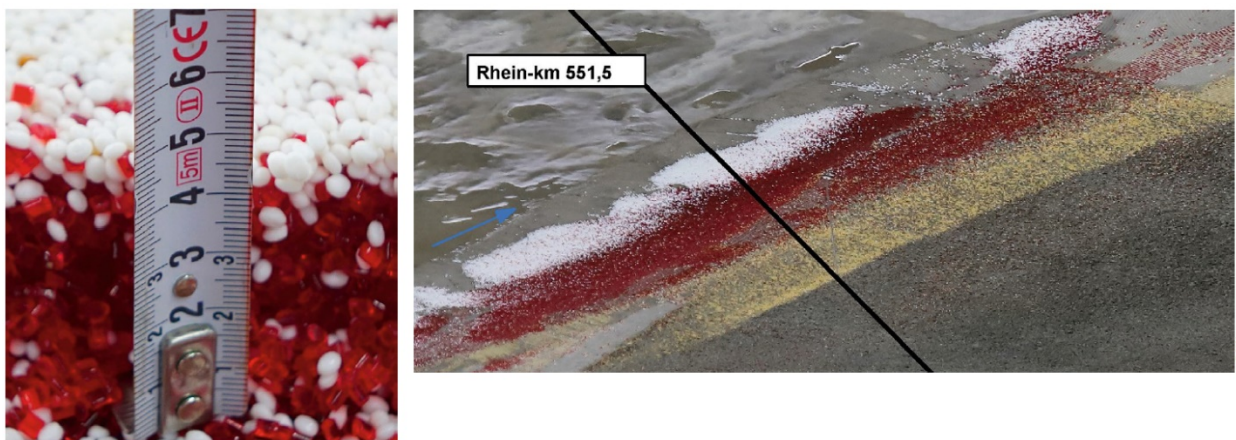


Bild 8: Links: Sohlenabpflasterung im Modell, Kieszunge bei Rhein-km 550,0, rechts: Sedimentsortierung am unterstromigen Ende der Kiesbank Jungferngrund. (Quelle: BAW)

Durch den Granulatdosierer (Zugabe) wurde die Kieszunge mit Sediment bzw. Geschiebematerial versorgt. Die Kieszunge war oberstrom der Zugabeposition unbeweglich hergestellt, unterstrom der Zugabe war diese vollbeweglich mit Ausnahme eines schmalen Berandungstreifens, der für die initiale Herstellung der Kieszunge vor Versuchsbeginn genutzt wurde. Der bewegliche Teil der Kieszunge wirkte als Kontrollvolumen, das während des instationären Versuchs weder erodiert noch akkumuliert werden durfte. Im Anschluss der Kieszunge durchlief das Geschiebe einen Transitbereich durch einen bei MW bis zu 8 m tiefen Kolk größtenteils über Fels, um dann die Kiesbank Jungferngrund zu erreichen. Im Abflussbereich zwischen MNQ und MQ wurde das Geschiebe auf einem

schmalen Band an der seitlichen Flanke der Kiesbank entlanggeführt. Hier lag auch der Anlandungsbereich, in dem regelmäßig gebaggert werden muss. Die Geschiebeanteile, die nicht zur Anlandung gelangten, wurden am unterstromigen Ende der Kiesbank in das tiefe Rinnensystem geleitet, das sich bis zum Loreleyfelsen fortsetzt.

Abflussereignisse deutlich über MQ sorgten für eine vollständige Überströmung der Kiesbank, mit der einige morphologische Prozesse einhergingen. Bild 9 unten zeigt das Modell in der Draufsicht nach einem instationären Versuch mit vollbeweglicher Kiesbank im entwässerten Zustand. Größere Sedimente (hier weißes Granulat) wurden überwiegend am oberstromigen Beginn der Kiesbank abgelagert (Bereich 1), mittlere Fraktionen eher im mittleren Bereich und in der unterstromigen Hälfte der Kiesbank (Bereich 2). Im Strömungsschatten der Kiesbank (Bereich 3) fand hingegen kaum morphologisches Geschehen statt. Auf der Kiesbank, zwischen den Bereichen 2 und 3 sowie entlang des rechten Ufers bildeten sich zudem Rinnen aus, die in ähnlicher Form auch in der Natur beobachtet werden konnten.



Bild 9: Oben: Funktionsbereiche im Modell, stationärer Versuch mit Sedimentanlandung auf unbeweglicher Kiesbank, unten: instationärer Versuch mit vollbeweglicher Kiesbank. (Quelle: BAW)

4 Zusammenfassung

In der Gebirgsstrecke des Mittelrheins kommt es am Innenufer einer Flusskrümmung bei Oberwesel zu Sedimentanlandungen im Bereich der Fahrrinne. Um die morphologischen Verhältnisse in der Flusskrümmung und insbesondere an der Kiesbank Jungferngrund näher zu untersuchen, führt die BAW einen großmaßstäblichen Modellversuch durch. Eine besondere Herausforderung bei der Modellierung bestand einerseits in der Nachbildung der komplexen Topografie des Flussbetts und andererseits in der Übertragung des Natursedimentes auf ein geeignetes Modellsediment.

Als Modellsediment wurden dazu erstmalig Kunststoffgranulate verschiedener Dichte als Granulatmischung eingesetzt, mit dem Ziel, die Natursedimente bestmöglich nachzubilden. Die experimentellen Grundlagenuntersuchungen für die Vorauswahl geeigneter Modellsedimente wurden durch die Hochschule Magdeburg in einem Flächenmodell mit Flusskrümmung durchgeführt. Die ersten Ergebnisse aus dem großmaßstäblichen Modellversuch der BAW und den Grundlagenuntersuchungen an der Hochschule Magdeburg zeigten, dass es grundsätzlich möglich ist, durch den Einsatz von Kunststoffgranulatmischungen wesentliche morphologische Prozesse im Bereich der Flusskrümmung naturähnlich nachzubilden.

Der Kalibrierprozess der Großmodells setzte eine fundierte Streckenkenntnis und Systemverständnis voraus. Wesentlich für den notwendigen Vergleich mit der Natur ist eine umfassende Basis an hydraulischen, sedimentologischen und morphologischen Messdaten und Prozessen. Mit Hilfe dieser Daten konnte eine Modellkalibrierung gelingen, die neben einem vertieften Prozessverständnis auch ein hohes Maß an Vertrauen in die Aussagekraft der Modellergebnisse und der Belastbarkeit der Prognosen für flussbauliche Maßnahmen darstellt. Letzteres ist für eine erfolgreiche Projektbearbeitung essentiell.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): Bundesverkehrswegeplan 2030 (www.bvwp-projekte.de/map_water.html, Abruf 01.03.2021).
- [2] BAW (Hrsg.): Geschäftsbericht 2018, 2019 (https://izw.baw.de/publikationen/geschaeftsberichte/0/BAW_Geschaeftsbericht_2018_web.pdf, Abruf 01.03.2021).
- [3] Ettmer, B.; Hentschel, B.; Link, O.: Neue Wege in der experimentellen morphodynamischen Modellierung durch die Verwendung von Kunststoffgranulat-Sieblinien. In: WasserWirtschaft 111 (2021), Heft 5, S. 16-22.
- [4] Orlik, S.; Baumgärtner, C.: Nachbildung von Geschiebeschüttkegeln mit Kunststoffgranulaten. In: WasserWirtschaft 111 (2021), Heft 5, S. 31-38.

- [5] Ettmer, B.; Hentschel, B.; Orlik, S.: Geschiebetransport im gegenständlichen Modell: Neue Ansätze zur naturähnlichen Abbildung komplexer morphodynamischer Prozesse. In: BAW (Hrsg.): Kolloquium Wasserbauliche Herausforderungen an den Binnenschiffahrtsstraßen, 26./27.10.2017, Karlsruhe.
- [6] BAW (Hrsg.): Ähnlichkeiten bei flussbaulichen Modellen. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (1984), Nr. 54.
- [7] Akstaller, M.; Hentschel, B.: Versuchsbetrieb mit Sedimentmischungen aus Kunststoffgranulaten. In: WasserWirtschaft 111 (2021), Heft 5, S. 59-66.
- [8] BAW (Hrsg.): Wasserbauliches Versuchswesen. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (2007), Nr. 90.
- [9] Godding, R.; Hentschel, B.; Kauppert, K.: Videometrie im wasserbaulichen Versuchswesen. In: Wasserwirtschaft, Wassertechnik (2003), Heft 4.

Experimental Investigation of sediment deposits in a river bend of the Middle Rhine

A sharp bend of the Middle Rhine in Germany near Oberwesel shows a navigational bottleneck in form of a large gravel bank called „Jungferngrund“. At this challenging situation for shipping gravel deposition takes place and dredging measures are recurrently necessary. The dredging measures themselves represent an additional obstacle for shipping. The Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW) investigates river training measures in a largescale model. The remarkable challenges of this model are the exact representation of complex bed rock topography, the sediment transport over bed rock and the wide grain size distribution from fine sand to coarse gravel. In a scale model the natural sediment has to be substituted with model sediment that shows similar transport und sedimentation behaviour. The aim of this paper is firstly to show a proof of appropriateness for using model sediment composed of a mixture of plastic granulates with different material density, conducted at the University of Applied Sciences at Magdeburg. Secondly the design of the largescale model, results of calibration and the agreement of morphodynamics between nature and model are presented.

Autoren

Thorsten Hüsener
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe
E-Mail: thorsten.huesener@baw.de

Daniel Hesse
Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit, Hochschule Magdeburg-Stendal
Breitscheidstraße 2, 39114 Magdeburg
E-Mail: daniel.hesse@h2.de