

Simulation des Geschiebetransports in Verzweigungsgerinnen mit 3-D-morphodynamischen Modellen

Das Verständnis von Geschiebetransportprozessen ist von großer technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Bedeutung, um Flüsse hinsichtlich ihrer natürlichen morphodynamischen Entwicklung zu analysieren sowie um Wasserbauwerke effektiv zu dimensionieren und betreiben. Die vorgestellte Forschung zeigt die Vorgehensweise und Methodik bei der 3-D-HN-Simulation von Geschiebetransportprozessen durch die Nachbildung einer Reihe physikalischer Versuche an einem Verzweigungsgerinne. In dieser Publikation erfolgt aufbauend auf dem in einer vorangegangenen Publikation beschriebenen Strömungsmodell eine ausführliche Darstellung der Simulation und Analyse des Geschiebetransports in Verzweigungsgerinnen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Geschiebetransport auch bei komplexen Strömungsverhältnissen numerisch gut abgebildet werden kann.

Tino Kostić und Stephan Theobald

1 Einführung

Die nachfolgend dargestellte Forschungsarbeit beschäftigt sich mit der morphodynamischen Simulation des Geschiebetransports zur Nachbildung einer Reihe physikalischer Modellversuche, die von Dr.-Ing. Hermann Bulle durchgeführt und im Jahr 1926 unter dem Namen „Untersuchungen über die Geschiebeableitung bei der Spaltung von Wasserläufen“ [1] veröffentlicht wurden. In den Laboruntersuchungen wurden Gerinneabzweigungen verschiedener Winkel aus einer geraden Flussstrecke nachgebildet. Dabei wurden Sedimente in das laufende Modell zugegeben und deren Verteilung auf die beiden Gerinnearme beobachtet. Durch diese Untersuchungen wurde festgestellt, dass bei gleich großer Durchflussaufteilung der bei weitem größte Teil des Geschiebes in einem Verzweigungsgerinne dem Seitenarm zustrebt.

Ziel des aktuellen Forschungsvorhabens ist es, die physikalischen Untersuchungen von Bulle numerisch nachzuweisen. Dabei sind auch die Vorgehensweise und typische Anwendungs-

grenzen der 3-D-hydrodynamisch-numerischen (3-D-HN) Nachbildung von Geschiebetransportprozessen aufzuzeigen. Die numerischen Forschungsergebnisse zu den Untersuchungen von Bulle werden thematisch in rein hydrodynamische sowie morphodynamische Untersuchungen getrennt und in zwei Publikationen veröffentlicht. In Kostić und Theobald [2] erfolgten die ausführliche Beschreibung des 3-D-HN-Modells sowie eine umfangreiche Analyse zu den Strömungsverhältnissen im Verzweigungsgerinne. In dieser Publikation werden basierend auf dem kalibrierten 3-D-HN-Modell aus [2] die durchgeführten Simulationen und Analysen zum Geschiebetransport im Bereich der Gerinneverzweigung vorgestellt.

In den Versuchen von Bulle wurden Gerinneverzweigungen mit verschiedenen Abzweigungswinkeln analysiert. Der größte Teil der physikalischen Versuche fand bei einem Gesamtdurchfluss von $Q = 5 \text{ l/s}$ mit einer Durchflussaufteilung von 50 % je Gerinnearm statt. Die Wassertiefe im Modell betrug ca. 7 cm [2]. Die Randbedingungen und Ergebnisse der von Bulle durchgeführten Untersuchungen sind für das Gerinnenmodell mit einem Abzweigungswinkel von 30° am ausführlichsten dokumentiert (**Bild 1**). Die nachfolgend dargestellten numerischen Untersuchungen konzentrieren sich daher auf die Versuche mit einem Durchfluss von $Q = 5 \text{ l/s}$ bei gleich großer Durchflussaufteilung auf die beiden Gerinnearme sowie Abzweigungswinkeln von 30° , 60° und 90° .

Bei den Versuchen von Bulle wurde dem physikalischen Modell auf halber Strecke zwischen dem Einlauf und der Gerinneverzweigung Sand über einen pendelnden Trichter zugegeben. Die physikalischen Versuche wurden für Versuchsdauern von 45 und 75 Minuten durchgeführt, wobei $1,67 \text{ g/s}$ Sedimente in das Modell eingegeben wurden, was in 45 Minuten 4,5 kg und in 75 Minuten 7,5 kg Sand entsprach.

Kompakt

- Das 3-D-morphodynamisch-numerische Modell ist geeignet für Simulation des Geschiebetransportes.
- Die Auswahl genauer Randbedingung des numerischen Modells ist wesentlich für Geschiebetransportnachbildung.
- Ein hoher Prozentanteil des Geschiebes landet im Seitenarm des Verzweigungsgerinnes für Modelle mit variierenden Abzweigungswinkeln.

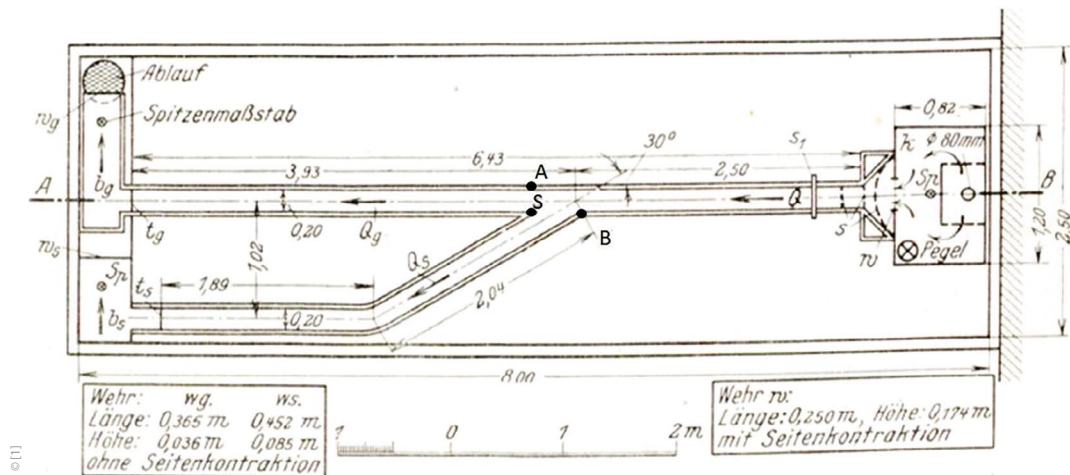


Bild 1: Schematische Darstellung des Verzweigungsgerinnes von Bulle

Die räumliche Zuordnung der Bereiche mit Geschiebetransport wurde für die physikalischen und numerischen Untersuchungen auf die gleiche Art und Weise durchgeführt. Dabei wurde das gesamte Geschiebe, das sich unterstrom von Querschnitt A-S (**Bild 1**) befindet, dem geraden Arm zugewiesen. Entsprechend entfällt das Geschiebe unterstrom des Querschnitts B-S auf den Abzweigarm und das Geschiebe, welches keinen der beiden Querschnitte passiert hat auf den Zulaufbereich.

2 Grundlagen der numerischen Geschiebemodellierung

2.1 Theoretische Grundlagen der untersuchten Transportansätzen

Der Sedimenttransport in Fließgewässern kann in Abhängigkeit der vorherrschenden hydraulischen Bedingungen sowie verschiedener Feststoffeigenschaften entweder sohlennah oder schwebend stattfinden. Als Geschiebe wird der Anteil der Sedimente bezeichnet, der sich größtenteils gleitend oder springend auf der Sohle bewegt. Der in Fließgewässern stattfindende Geschiebetransport kann mit Hilfe einer Vielzahl von Transportformeln abgeschätzt werden, die größtenteils empirisch abgeleitet wurden. Aufgrund ihrer empirischen Basis ist die Anwendung der verschiedenen Berechnungsansätze in der Regel nur für die jeweils untersuchten Randbedingungen, beispielsweise hinsichtlich Materialeigenschaften und Fließgewässereigenschaften, zulässig [3]. Eine der gängigsten Geschiebetransportformeln ist die Formel nach Meyer-Peter und Müller (MPM), die für den Transport von größerem Sand und Kies ($d > 1,0 \text{ mm}$) in schnelleren Gewässern, wie beispielsweise Wildbächen, ermittelt wurde [4]. Eine weitere Geschiebetransportformel, die Formel nach Van Rijn, wurde dagegen für den Transport von Sand ($d = 0,2 \text{ bis } 2 \text{ mm}$) in Fließgewässern mit geringem Gefälle entwickelt [5].

Die numerischen Untersuchungen wurden mit der 3-D-HN-Software Flow-3-D des Herstellers Flow Science durchgeführt. In Flow-3-D kann Sedimenttransport als Bewegung von Schwebstoffen und Geschiebe numerisch nachgebildet werden. Der Fokus der vorgestellten Forschung liegt auf der Untersuchung des Geschiebetransports an Gerinneverzweigungen. Nachfol-

gend werden die dort auftretenden Geschiebetransportprozesse daher im Detail beschrieben, auf den Schwebstofftransport wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

Das ruhende Geschiebe wird von Flow-3-D als unbeweglicher Festkörper berücksichtigt, wobei in den vollständig mit Geschiebe gefüllten Rechenzellen keine Strömungsgleichungen gelöst werden. Mit Geschiebe teilgefüllte Zellen werden entsprechend um das Festkörpervolumen reduziert. Die durch die Strömung von Zelle zu Zelle bewegte Geschiebemenge wird nicht als Festkörper angenommen, sondern mit Hilfe der gewählten Geschiebetransportgleichung berechnet. In der aktuellen Version von Flow-3-D (Version 12) ist es möglich, eine der Geschiebetransportgleichungen nach MPM, Van Rijn und Nielsen zu wählen [6]:

$$\text{Meyer-Peter und Müller: } \Phi_i = \beta_{\text{MPM},i} \cdot (\theta_i - \theta'_{\text{cr},i})^{1,5} \cdot c_{b,i} \quad (1)$$

$$\text{Van Rijn: } \Phi_i = \beta_{\text{VR},i} \cdot d_{*,i}^{-0,3} \cdot \left(\frac{\theta_i}{\theta'_{\text{cr},i}} - 1,0 \right)^{2,1} \cdot c_{b,i} \quad (2)$$

$$\text{Nielsen: } \Phi_i = \beta_{\text{Nie},i} \cdot \theta_i^{0,5} \cdot (\theta_i - \theta'_{\text{cr},i}) \cdot c_{b,i} \quad (3)$$

mit:

$$\text{Strömungsintensität: } \theta_i = \frac{\tau}{g \cdot d_i \cdot (\rho_i - \rho_f)} \quad (4)$$

$$\text{Kritische Sohlenschubspannung: } \theta'_{\text{cr},i} = \frac{0,3}{1+1,2 \cdot d_{*,i}} + 0,055 \cdot (1 - e^{(-0,02 \cdot d_{*,i})}) \quad (5)$$

$$\text{Dimensionslose Korngröße: } d_{*,i} = d_i \cdot \left[\frac{\rho_f \cdot (\rho_i - \rho_f) \cdot g}{\mu_f^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Dabei ist ϕ_i die Transportintensität der jeweiligen Kornfraktion i mit einem Anteil von $c_{b,i}$ am gesamten Sediment, der ein maßgebender Korndurchmesser d_i und eine dimensionslose Korngröße $d_{*,i}$ zuzuordnen sind. In den verschiedenen Berechnungsansätzen für die Transportintensität ϕ_i wird neben der Strömungsintensität θ_i und der kritischen Sohlenschubspannung $\theta'_{\text{cr},i}$ jeweils ein ansatzspezifischer Beiwert β berücksichtigt.

Der Aufbau der Geschiebetransportformeln nach MPM (Gl. (1)) und Nielsen (Gl. (3)) ist ähnlich, weshalb beide Ansätze in den durchgeführten Simulationen sehr ähnliche Ergebnisse

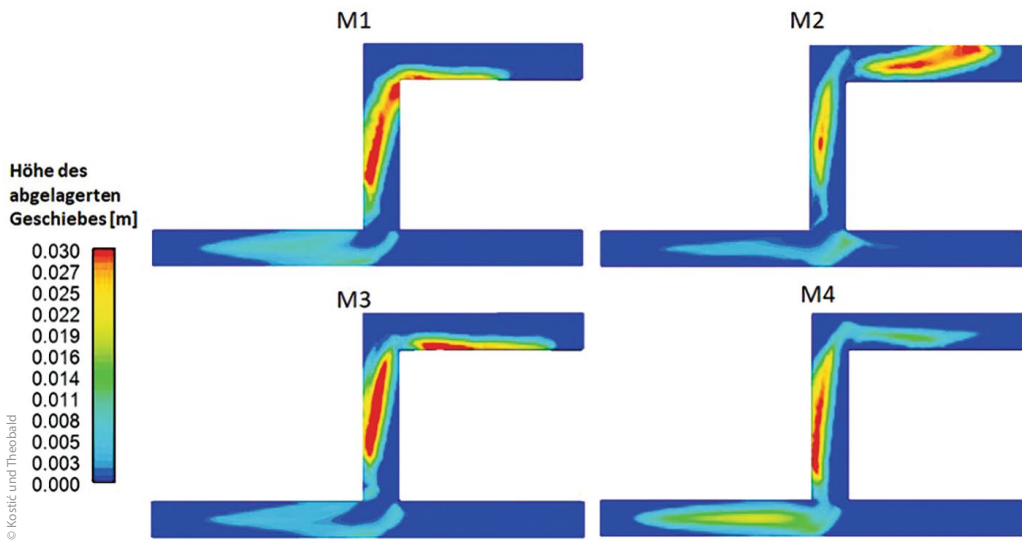


Bild 2: Geschiebeablagerungen der Varianten M1, M2, M3 und M4 für einen Verzweigungswinkel von 90° nach 45 Minuten Versuchsdauer

liefern, die sich jedoch von den Ergebnissen der Transportformel nach Van Rijn (Gl. (2)) merklich unterscheiden. Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen konzentrieren sich daher auf die Ansätze nach MPM und nach Van Rijn. Die Transportformel nach Nielsen wurde aufgrund der Ähnlichkeit zur Transportformel nach MPM nicht gesondert untersucht.

2.2 Wahl von Turbulenzmodell und Transportansatz

Wie in Kostić und Theobald [2] beschrieben, wurden die hydraulischen Randbedingungen und Netzeigenschaften des numerischen Modells anhand einer Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der hydraulischen Parameter bestimmt. Hierbei wurden verschiedene Eigenschaften des physikalischen Modells (Einlaufbereich, Einbauten etc.) möglichst detailliert in das numerische Modell übernommen. Zudem wurde

ein für die Geschiebeuntersuchungen optimiertes Rechenetz mit einer allgemeinen Netzelementgröße von 0,01 m erstellt. Im für den Geschiebetransport besonders relevanten Sohlenbereich des Gerinnes wurden die ersten drei Netzebenen mit einer Auflösung von 0,005 m zusätzlich feiner diskretisiert. Generell wurde das in [2] beschriebene Rechenetz resp. Modell für die morphodynamischen Simulationen verwendet.

Bulle gibt für den verwendeten Sand zur Sedimentgröße lediglich an, dass die maximale Korngröße $d = 1,2$ mm betrug und dass ein Raumgewicht von $\rho = 1\,500$ kg/m³ im lufttrockenen Zustand gemessen wurde. Bei Annahme von einer Sedimentkorndichte von $\rho = 2\,650$ kg/m³ ergibt sich somit eine Sandporosität von 43,4 %, was auf eine Verwendung von Quarzsand hinweist. Für alle numerischen Untersuchungen wurde daher

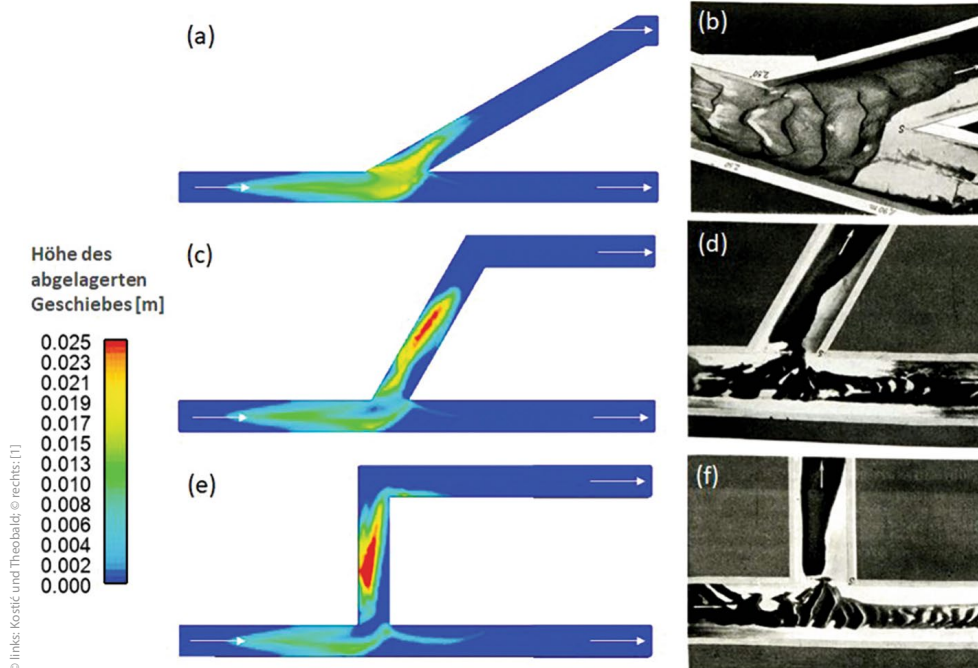


Bild 3: Geschiebeablagerungen entsprechend der Modelle mit einem Verzweigungswinkel von 30° (a) numerisch und (b) physikalisch), 60° (c) numerisch und (d) physikalisch) und 90° (e) numerisch und (f) physikalisch) nach einer Versuchsdauer von 45 Minuten

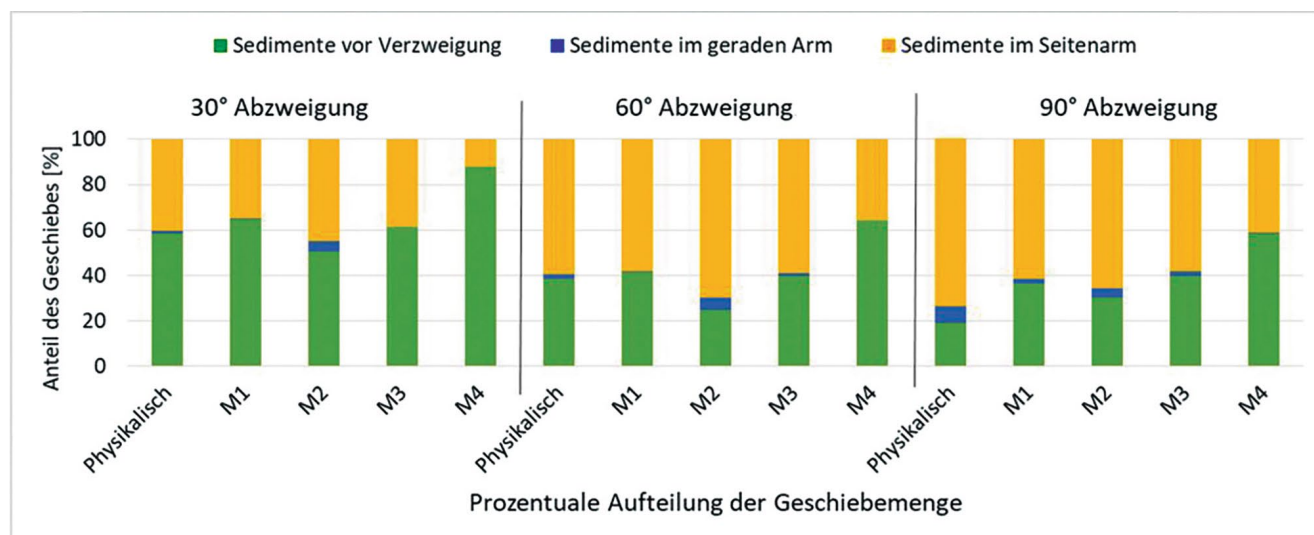


Bild 4: Prozentuale Aufteilung der Geschiebemengen für das physikalische Modell und die numerischen Modellvarianten für Abzweigungswinkel von 30°, 60° und 90° nach 45 Minuten Versuchsdauer

eine Sandkorndichte von $2\,650\text{ kg/m}^3$ gewählt. Eine maximale Korngröße von $d = 1,2\text{ mm}$ und eine mittlere Korngröße von $d = 0,5\text{ mm}$ entspricht etwa der Sieblinie von Mittelsand. Für die Voranalyse zur Modellauswahl wurde deshalb zunächst ein Einkornsediment mit einem Korndurchmesser von $d = 0,5\text{ mm}$ gewählt.

Um im nächsten Schritt für die numerische Geschiebetransportmodellierung eine geeignete Kombination aus Turbulenzmodell und Transportansatz zu bestimmen, werden nachfolgend die numerisch ermittelten Sedimentablagerungen für verschiedene Modellvarianten mit den Ergebnissen des physikalischen Modells verglichen. Als Versuchsdauer wurde für die numerischen Untersuchungen entsprechend der physikalischen Untersuchungen ein Zeitraum von 45 Minuten gewählt.

Die verschiedenen numerischen Modellvarianten sind:

- Modell 1 (M1): Modell mit vollständiger Nachbildung von Einlaufbecken und Überfallwehr sowie LES-Turbulenzmodell und Van-Rijn-Geschiebetransportmodell
- Modell 2 (M2): Modell mit vollständiger Nachbildung von Einlaufbecken und Überfallwehr sowie RNG-Turbulenzmodell und Van-Rijn-Geschiebetransportmodell
- Modell 3 (M3): Modell mit vollständiger Nachbildung von Einlaufbecken und Überfallwehr sowie LES-Turbulenzmodell und MPM Geschiebetransportmodell
- Modell 4 (M4): Modell mit vereinfachter vertikaler Anfangsdruckrandbedingung sowie LES-Turbulenzmodell und Van-Rijn-Geschiebetransportmodell

In **Bild 2** sind die Geschiebeablagerungen der Modellvarianten M1 bis M4 für einen Abzweigungswinkel von 90° nach 45 Minuten Versuchsdauer dargestellt. Für die Modelle mit 30°- und 60°-Abzweigungswinkel lassen sich die gleichen Schlussfolgerungen ziehen.

Die untersuchten Modellvarianten M2 bis M4 unterscheiden sich jeweils durch eine einzelne Modifikation hinsichtlich der gewählten Randbedingung, des Turbulenzmodells oder des Geschiebetransportmodells von Modellvariante M1. Die Ergeb-

nisse dieser Modellvarianten wurden daher jeweils mit den Ergebnissen der Modellvariante M1 verglichen. Eine Gegenüberstellung der Modellvarianten M1 und M4 zeigt beispielsweise, dass sich für M4 ein größerer Anteil des Geschiebes vor der Verzweigung abgelagert. Der größte Teil des Geschiebes im Seitenarm sammelt sich bei Variante M4 in einem schmalen Bereich nahezu parallel zur linken Seitenwand und reicht erst kurz vor der zweiten Kanalkrümmung deutlich über die Mitte des Gerinnes hinaus. Bei Modellvariante M1 lagert sich das Geschiebe dagegen bereits nach einer deutlich geringeren Fließstrecke schräg innerhalb des Seitenarms ab. Die Form der Ablagerung in Modellvariante M1 stimmt somit deutlich besser mit den Ergebnissen der physikalischen Untersuchungen von Bulle (**Bild 3f**) überein. Ursache hierfür sind die unterschiedlichen Geschwindigkeitsverteilungen von M1 und M4. Auch wenn die mittleren Geschwindigkeiten und Wassertiefen der beiden Modellvarianten nahezu gleich sind, zeigt M1 durch den Wehrüberfall im Zulaufbereich höhere sohlennahe Geschwindigkeiten als M4, woraus ein Einfluss auf den Geschiebetransport resultiert. Für das in M2 verwendete RNG-Turbulenzmodell resultieren aufgrund der zeitlichen Mittelung der Strömungsparameter Bereiche mit durchweg höheren bzw. geringeren mittleren Geschwindigkeiten, die einen merklichen Einfluss auf die Geschiebeablagerungen haben. Modellvariante M2 zeigt daher eine räumlich unterbrochene Geschiebeablagerung. Es ist davon auszugehen, dass das in den Varianten M1, M3 und M4 verwendete LES-Turbulenzmodell für ein ausreichend feines Rechenetz die fluktuierenden Strömungseffekte und den einhergehenden Einfluss auf den Geschiebetransport besser abbilden kann. Die Modellvarianten M1 und M3 unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der verwendeten Transportansätze. Die beiden Modellvarianten zeigen unter Anwendung der üblichen Werte für die Parameter der Transportansätze relativ ähnliche Geschiebeablagerung. Es wird jedoch ersichtlich, dass sich für den Ansatz nach MPM im Vergleich zum Ansatz nach Van Rijn und den physikalischen Ergebnissen

Tabelle 1: Prozentuale Geschiebeaufteilung auf den Bereich vor der Verzweigung, den geraden Arm und den Abzweigarm entsprechend der physikalischen und numerischen Untersuchungen für Abzweigwinkel von 30°, 60° und 90° nach 45 und 75 Minuten Versuchsdauer (Quelle: Kostić und Theobald)

Abzweigwinkel [°]	Versuchsdauer [min]	Modell	Sedimente vor der Verzweigung [%]	Sedimente im geraden Arm [%]	Sedimente im Seitenarm [%]
30	45	Physikalisch	58,44	1,11	40,44
30	45	Numerisch	63,28	1,21	35,51
30	75	Physikalisch	16,25	3,75	80,00
30	75	Numerisch	47,07	2,34	50,65
60	45	Physikalisch	38,44	2,33	59,22
60	45	Numerisch	42,08	1,82	56,10
60	75	Physikalisch	24,80	4,27	70,93
60	75	Numerisch	28,58	1,58	69,84
90	45	Physikalisch	18,78	7,67	75,48
90	45	Numerisch	34,88	3,44	61,68
90	75	Physikalisch	25,13	6,40	68,47
90	75	Numerisch	22,62	5,35	72,04

(Bild 3f) Geschiebe im Seitenarm eher parallel zur Seitenwand und weniger schräg zur Verzweigung abgelagert.

Bild 4 zeigt die prozentualen Geschiebeanteile vor der Verzweigung sowie im Bereich des geraden und des abzweigenden Arms für die Modellvarianten M1-M4 und für das physikalische Modell. Dargestellt sind die Ergebnisse für Abzweigwinkel von 30°, 60° und 90° nach jeweils 45 Minuten Versuchsdauer. Es wird ersichtlich, dass die Ergebnisse des Modelles M4 von den physikalischen Ergebnissen stark abweichen. Die Modelle M1-M3 zeigen relativ ähnliche prozentuale Geschiebeaufteilungen, wobei bei M2 stets weniger Geschiebe vor der Verzweigung verbleibt und mehr in den geraden Arm transportiert wird. Die Modelle M1 und M3 zeigen nahezu identische prozentuale Geschiebeaufteilungen.

Aus den Bildern 2 und 4 wird die Bedeutung des gewählten Turbulenzmodells sowie Transportansatzes deutlich. Modellvariante M1 zeigt insgesamt die beste Übereinstimmung zu den Ergebnissen des physikalischen Modells und wurde daher für die weiteren Untersuchungen verwendet.

2.3 Untersuchung verschiedener Kornfraktionen

Ein Unterschied zwischen der numerisch mit dem LES-Turbulenzmodell für das Einkornsediment ermittelten Geschiebeaufteilung und der Geschiebeaufteilung im physikalischen Modell ist der größere Anteil der Sedimente im geraden Arm des Verzweigungsgerinnes bei den physikalischen Untersuchungen (Bild 4). Eine mögliche Ursache hierfür könnten feinere Sedimentfraktionen innerhalb der Sieblinie des im physikalischen

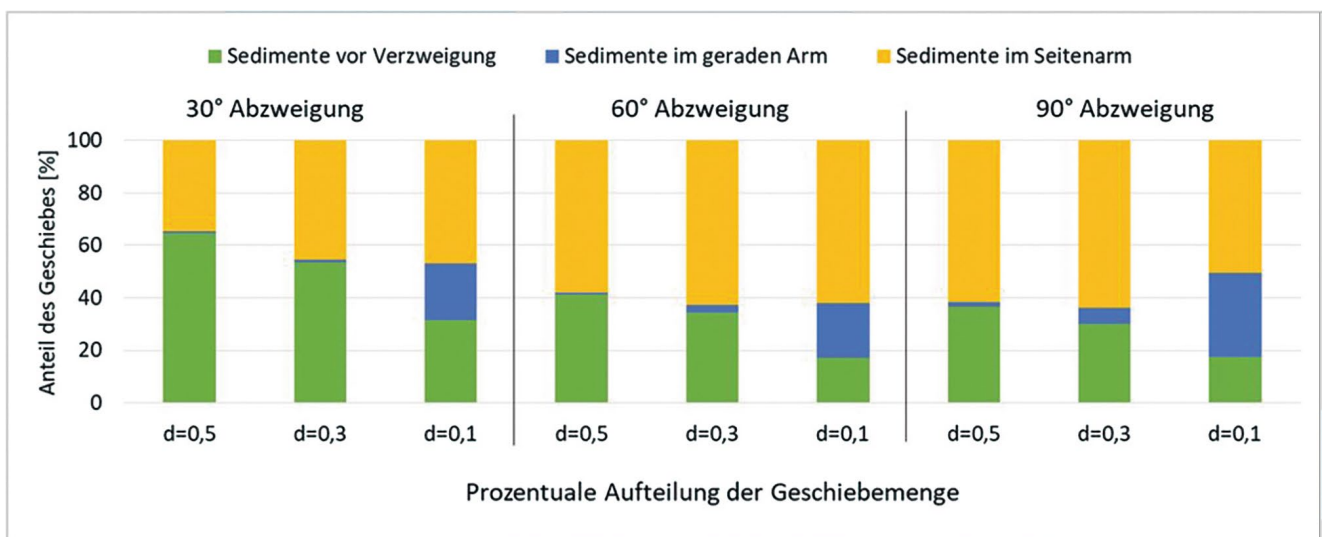


Bild 5: Prozentuale Aufteilung der Geschiebemengen für das numerische Modell (M1) mit verschiedenen Kornfraktionen für Abzweigwinkel von 30°, 60° und 90° nach 45 Minuten Versuchsdauer

Modell verwendeten Sediments sein, zu denen Bulle keine konkrete Aussage trifft.

Um den Einfluss des Korndurchmessers auf die Geschiebeaufteilung im Verzweigungsgerinne abzuschätzen, wurden bei unveränderten hydraulischen Randbedingungen und verschiedenen Verzweigungswinkeln Einkornsedimente mit unterschiedlichen Korndurchmessern zwischen $d_{min} = 0,1$ mm und $d_{max} = 0,5$ mm numerisch untersucht. Auch für die kleinsten untersuchten Korndurchmesser fand der Transport nahezu ausschließlich als Geschiebe statt. Die zugehörigen Ergebnisse sind als prozentuale Anteile der Geschiebemenge je Modellbereich in **Bild 5** aufgeführt.

Aus **Bild 5** wird ersichtlich, dass der Geschiebeanteil im geraden Arm für alle Verzweigungswinkel mit abnehmendem Korndurchmesser zunimmt. Dieses Ergebnis führt zu der Annahme, dass das im physikalischen Modell verwendete Sediment auch feinere Kornfraktionen enthielt. Für die weiteren numerischen Untersuchungen wurde deshalb statt eines Einkornsediments mit einem Korndurchmesser von $d = 0,5$ mm eine Sieblinie mit drei Kornfraktionen ausgewählt. Die mit einem Anteil von 60 % größte Kornfraktion weist weiterhin einen Korndurchmesser von $d = 0,5$ mm auf. Zusätzlich wurden zwei Fraktionen mit einem Korndurchmesser von $d = 0,15$ mm respektive $d = 0,85$ mm verwendet, deren Anteil am Sediment jeweils 20 % beträgt. Durch diese Kornaufteilung blieb die Sieblinie symmetrisch und im Bereich von Mittelsand. Die Korndichte blieb für alle untersuchten Sedimentfraktionen unverändert bei $\rho = 2\,650$ kg/m³.

3 Ergebnisse der numerischen Untersuchungen

In **Tabelle 1** ist die prozentuale Geschiebeaufteilung auf den Bereich vor der Gerinneverzweigung, den geraden Arm und den

Seitenarm für das physikalische Modell sowie für das numerische Modell in der Modellvariante M1 unter Anwendung der gemischten Kornfraktion ($d = 0,5$ mm, $d = 0,15$ mm und $d = 0,85$ mm) aufgelistet. Die Untersuchungen wurden weiterhin mit unveränderten hydraulischen Randbedingungen, daher einem Durchfluss von $Q = 5$ l/s (symmetrische Durchflussaufteilung) sowie einer mittleren Wassertiefe von ca. 7 cm durchgeführt. Auch die sedimentnumerischen Parameter waren für alle Modelle gleich.

Die Ergebnisse aus **Tabelle 1** zeigen für das numerische und das physikalische Modell grundsätzlich eine gute Übereinstimmung zwischen den prozentualen Geschiebeaufteilungen auf die einzelnen Gerinneabschnitte.

Für das Modell mit einem Abzweigwinkel von 30° wird ersichtlich, dass sich nach einer Versuchsdauer von 45 Minuten im physikalischen Modell ein etwas größerer Anteil des Sediments im Seitenarm ablagert als dies im numerischen Modell der Fall ist. Gleichzeitig zeigt sich für den Bereich vor der Gerinneverzweigung ein umgekehrtes Bild. Im numerischen Modell verbleibt in diesem Bereich ein höherer Anteil der Sedimente als im physikalischen Modell. Nach 75 Minuten lagert sich im Seitenarm des physikalischen Modells mit einem Verzweigungswinkel von 30° schließlich wesentlich mehr Geschiebe als im numerischen Modell ab. Mit einem Anteil von 80 % liegt der Anteil der Sedimente im Seitenarm des physikalischen Modells für diesen Abzweigwinkel jedoch auch insgesamt höher als bei allen anderen numerischen und physikalischen Untersuchungen. Für die numerischen Modelle mit einem Abzweigwinkel von 60° und 90° stimmen die prozentualen Ablagerungen im Seitenarm dagegen sowohl nach 45 Minuten als auch nach 75 Minuten Versuchsdauer gut bis sehr gut mit denen des physikalischen Modells überein. In den geraden Arm der numerischen Modelle wird für alle Abzweigwinkel etwas weniger Geschiebe transportiert als es bei den physikalischen Untersuchungen der Fall ist. Eine Ausnahme hiervon stellt lediglich das Modell mit einem Verzwei-

Tabelle 2: Prozentuale Geschiebeaufteilung auf den geraden Arm und den Abzweigarm entsprechend der physikalischen und numerischen Untersuchungen für Abzweigwinkel von 30°, 60° und 90° nach 45 und 75 Minuten Versuchsdauer (Quelle: Kostić und Theobald)

Abzweigwinkel [°]	Versuchsdauer [min]	Modell	Sedimente im geraden Arm [%]	Sedimente im Seitenarm [%]
30	45	Physikalisch	2,67	97,33
30	45	Numerisch	3,30	96,70
30	75	Physikalisch	4,48	95,52
30	75	Numerisch	4,42	95,58
60	45	Physikalisch	3,79	96,21
60	45	Numerisch	3,14	96,86
60	75	Physikalisch	5,68	94,32
60	75	Numerisch	2,21	97,79
90	45	Physikalisch	9,22	90,78
90	45	Numerisch	5,28	94,72
90	75	Physikalisch	8,55	91,45
90	75	Numerisch	6,91	93,09

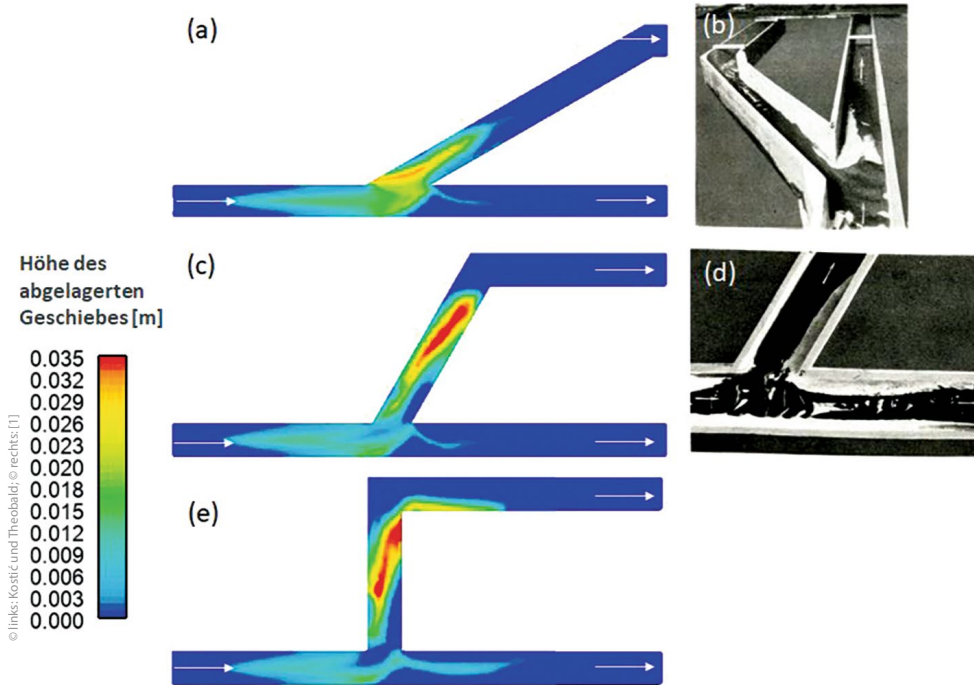


Bild 6: Geschiebeablagerungen entsprechend der Modelle mit einem Verzweigungswinkel von 30° (a) numerisch und (b) physikalisch), 60° (c) numerisch und (d) physikalisch) und 90° (e) numerisch) nach einer Versuchsdauer von 75 Minuten

gungswinkel von 30° nach 45 Minuten dar, bei welchem im numerischen Modell etwas mehr Geschiebe in den geraden Arm transportiert wird als im physikalischen Modell.

Die numerisch und physikalisch ermittelten Geschiebeablagerungen nach 45 und 75 Minuten sind für die verschiedenen Versuchskonstellationen zusätzlich in den **Bildern 3** und **6** gegenübergestellt. Bezüglich der beiden Bilder ist anzumerken, dass aufgrund der Auflösung der Farbskala die sehr flachen Geschiebeablagerungen im geraden Arm des numerischen Modells nicht in ihrer vollen Ausdehnung zu erkennen sind.

In **Bild 3** wird die gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen des numerischen Modells (**links**) und des physikalischen Modells (**rechts**) nach 45 Minuten Versuchsdauer erneut deutlich. Sowohl das physikalische als auch das numerische Modell zeigen für einen Abzweigwinkel von 30° (**Bilder 3a** und **3b**) eine verstärkte Ablagerung des Geschiebes an der linken Seite des abzweigenden Arms. Für die Modelle mit 60° und 90° Abzweigwinkel (**Bild 5**) ist im ersten Teil des abzweigenden Arms eine ähnliche Tendenz hinsichtlich der Geschiebeablagerungen ersichtlich. Grund hierfür sind die erhöhten Geschwindigkeiten im Bereich der Verzweigungsspitze sowie die geringeren Geschwindigkeiten in der Ablösezone auf der linken Seite des abzweigenden Arms, die aus der lokalen Gerinnegeometrie resultieren (s. a. [2]). Bei den Abzweigwinkeln von 60° und 90° lagert sich erst nach einer Fließstrecke von mehr als einer Gerinnebreite ein zunehmender Anteil des Geschiebes auch mittig im Gerinne und rechts von der Gerinnehalbierenden ab.

In **Bild 6** sind die numerisch und physikalisch ermittelten Geschiebeablagerungen nach einer Versuchsdauer von 75 Minuten abgebildet. Die Aufzeichnungen von Bulle enthalten für die physikalischen Untersuchungen bei einer Versuchs-

dauer von 75 Minuten und einem Verzweigungswinkel von 90° keine Abbildungen zu der Geschiebeablagerung.

Hinsichtlich der qualitativen Geschiebeverteilung ergibt sich nach einer Versuchsdauer von 75 Minuten insgesamt ein ähnliches Bild wie nach 45 Minuten. Die Ergebnisse der physikalischen und numerischen Untersuchungen stimmen weiterhin gut überein. Tendenziell wandern die Geschiebeablagerungen aufgrund der erhöhten Versuchsdauer sowohl für das physikalische als auch das numerische Modell weiter in den Bereich nach der Gerinneverzweigung. Zudem verlagern sich die Geschiebeablagerungen im abzweigenden Arm etwas mehr in Richtung der Gerinnemitte. Insbesondere für den Abzweigwinkel von 30° scheinen sich die Ablagerungen im physikalischen Modell etwas weiter stromab zu erstrecken als im numerischen Modell. Für die Abzweigwinkel von 60° und 90° ist aufgrund der Bildgrenzen bzw. der fehlenden Abbildung diesbezüglich keine abschließende Aussage möglich.

An dieser Stelle ist hinsichtlich der größeren Versuchsdauer von 75 Minuten zu erwähnen, dass die numerischen Ergebnisse mit der einhergehenden Zunahme der Höhe der Sedimentablagerungen tendenziell ungenauer werden. Dies ist auf die in Kostić und Theobald [2] beschriebene Rechenetzstruktur zurückzuführen. Mit steigender Höhe der Sedimentablagerungen werden die feineren Rechenzellen im Bereich der Gerinnesohle zunehmend aufgefüllt, so dass gröbere Rechenzellen die Funktion der durchströmten Randzellen übernehmen müssen. Entsprechend wäre für längere Versuche gegebenenfalls auch in höheren Netzebenen eine feinere Diskretisierung erforderlich.

Tabelle 2 zeigt ergänzend die prozentuale Aufteilung des Geschiebeanteils, der die Schnitte AS bzw. BS (**Bild 1**) passiert hat, ohne dabei den vor den Schnitten verbleibenden Geschie-

beanteilt zu berücksichtigen. Aus **Tabelle 2** wird eine sehr gute Übereinstimmung der prozentualen Aufteilungen zwischen den zwei Verzweigungsarmen für das numerische und physikalische Modell ersichtlich.

4 Fazit

Ziel des Forschungsvorhabens war es, verschiedene physikalische Untersuchungen von Dr.-Ing. Hermann Bulle [1], die sich mit den hydraulischen und morphologischen Verhältnissen an Gerinneverzweigungen beschäftigen, mithilfe (3-D-HN-)Methoden nachzubilden.

Wie bereits in der Publikation zu den hydraulischen Verhältnissen an Verzweigungsgerinnen [2] erwähnt, wird erneut die große Bedeutung einer genauen Bestimmung geeigneter Modellparameter zur naturnahen Abbildung der auftretenden Strömungs- und Transportprozesse mit einem numerischen Modell deutlich. Neben den Randbedingungen und der Struktur des Rechnernetzes, deren Einfluss bereits in [2] untersucht wurde, haben weitere Eigenschaften, wie beispielsweise das Turbulenzmodell, der Transportansatz und die Korngröße des untersuchten Sediments, einen zusätzlichen Einfluss auf den Geschiebetransport.

Die numerischen Ergebnisse zeigen für die beschriebenen Modellparameter sowohl hinsichtlich der Hydraulik als auch hinsichtlich des Geschiebetransports eine hohe Übereinstimmung mit den Ergebnissen des physikalischen Modells von Bulle. Sowohl die Geschiebeaufteilung zwischen den Gerinneabschnitten als auch die Lage der Geschiebeablagerungen können mit dem numerischen Modell gut nachgebildet werden. Der am physikalischen Modell beschriebene Effekt eines Eintrags des größten Geschiebeanteils in den abzweigenden Gerinnearm zeigt sich auch im numerischen Modell deutlich.

Die in dieser Publikation und in [2] vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass der Geschiebetransport auch für komplexe Strömungsverhältnisse mittels 3-D-HN-Verfahren gut nachgebildet werden kann. Voraussetzung hierfür sind eine umfangreiche Erfahrung bei der 3-D-HN-Modellierung und eine sorgfältige Wahl der Modellparameter, die in Abhängigkeit der untersuchten Fragestellung variieren können. Für die Wahl

sind daher ggf. Daten aus Felduntersuchungen und physikalischen Modelluntersuchungen auch weiterhin von großer Bedeutung.

Autoren

Dipl.-Ing. Tino Kostić

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald

Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft

Universität Kassel

Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel

t.kostic@uni-kassel.de

s.theobald@uni-kassel.de

Literatur

- [1] Bulle, H.: Untersuchungen über die Geschiebeableitung bei der Spaltung von Wasserläufen. Berlin: VDI-Verlag, 1926.
- [2] Kostić, T.; Theobald, S.: 3-D-hydrodynamisch-numerische Analyse der Strömungsverhältnisse in Verzweigungsgerinnen. In: Wasserwirtschaft 111 (2021), Heft 12, S. 32-38.
- [3] Zanke, U.: Hydraulik für den Wasserbau. Heidelberg: Springer, 2013.
- [4] Hager, W. H.; Boes, R. M.: Eugen Meyer-Peter and the MPM Sediment Transport Formula. In: J. Hydraul. Eng. 144 (2018), Nr. 6.
- [5] van Rijn, L. C.: Sediment Transport, Part 1: Bed Load Transport. In: J. Hydraul. Eng. 110 (1984), Nr. 10, S. 1 431-1 456.
- [6] Flow Science Inc. (Hrsg.): FLOW-3D v12.0 User Manual. 2019.
- [7] Träbing, K.; Dickel, S.; Theobald, S.: Bauwerkshydraulik und Standortoptimierung für Kleinwasserkraftwerke in China. In: Wasserwirtschaft 109 (2019), Heft 6, S. 36-42.
- [8] Dutta, S.; Wang, D.; Tassi, P.; Garcia, M. H.: Three-dimensional numerical modeling of the Bulle-effect: the nonlinear distribution of near-bed sediment at fluvial diversions. Earth Surface Processes and Landforms 42 (2017), Nr. 14.

Tino Kostić and Stephan Theobald

3D CFD sediment flow analysis in bifurcations

Understanding sediment movement is of great technical, economic and environmental interest for the analysis of natural river morphodynamics and for the design and operation of hydraulic structures. This research focuses on the approach and methodology of 3-D CFD simulations of sediment transport through reproduction of a series of physical models of a channel bifurcation. This paper presents a detailed analysis of sediment transport based on a bifurcation model described in a previous article. The results show that even for complex hydraulic conditions, sediment movement can be successfully simulated with CFD tools.

 Springer Professional

Geschiebetransport 

Patt, H.; Speerli, J.; Gonsowski, P.: Feststofftransport, Gewässerbettynamik und Fließgewässertypologie. In: Wasserbau, Wiesbaden; Springer Vieweg, 2021. www.springerprofessional.de/link/19778016

Müller, F.; Ettmer, B.; Link, O.: Kolkexperimente an Brückenpfeilern unter Sedimenttransportbedingungen mit Polystyrolgranulat. In: Wasserwirtschaft, Ausgabe 5/2021. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021. www.springerprofessional.de/link/19128556