

3-D-morphodynamisch-numerische Simulation eines großräumigen Verzweigungsgerinnes

Ziel des hier dargestellten Forschungsvorhabens ist die numerische Nachbildung von Geschiebe-transportprozessen in Verzweigungsgerinnen und die Ergebnisbewertung der numerischen Geschiebetransportsimulationen. Dazu wurde ein großräumiges Verzweigungsgerinne numerisch nachgebildet und Vergleiche zwischen den Ergebnissen der numerischen und gegenständlichen Modellversuche bezüglich abgelagerter Geschiebeform, Geschiebeaufteilung auf die Gerinnebereiche sowie zeitlichem Verlauf des Geschiebetransportes durchgeführt.

Tino Kostić und Stephan Theobald

1 Einführung

Das Verständnis von Sedimenttransport, besonders von Geschiebetransportprozessen, ist von großer technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Bedeutung, um Flüsse hinsichtlich ihrer natürlichen morphodynamischen Entwicklung zu analysieren und um Wasserbauwerke effektiv zu dimensionieren sowie zu betreiben. Insbesondere die Bauwerkshydraulik wird in großem Maße von Geschiebeablagerungen beeinflusst. Dabei üben die hydrodynamischen und morphodynamischen Prozesse einen wechselwirkenden Einfluss aufeinander aus. Hieraus wird der Bedarf für die Vorhersage des zeitlichen Geschiebeverlaufes deutlich. Zur Analyse und Vorhersage des Geschiebetransportes können gegenständliche und numerische Modelle eingesetzt werden.

Rein hydrodynamische Untersuchungen im 3-D-Bereich werden in der wasserbaulichen Praxis seit Jahren erfolgreich verwendet, eine effiziente 3-D-morphodynamisch-numerische (MN) Modellierung ist in der Wasserbaupraxis hingegen noch eine große Herausforderung. Die in der Vergangenheit durchgeführten und dokumentierten Untersuchungen zeigen einen erheblichen Forschungsbedarf, um präzise 3-D-MN-Simulationen erfolgreich durchzuführen, insbesondere, wenn komplexe

Strömungsverhältnisse vorliegen, wie dies z. B. in Verzweigungsgerinnen mit den vorhandenen Sekundärströmungen der Fall ist. Es stellt sich daher die Frage, inwieweit 3-D-MN-Modellierungen in der Lage sind, die komplexen Geschiebetransportprozesse in Verzweigungsgerinnen abzubilden.

Die erste systematische Forschungsarbeit über Verzweigungsgerinne wurde in einer Reihe gegenständlicher Modellversuche von Dr.-Ing. Hermann Bulle 1926 [1] durchgeführt, in welcher Abzweigungen mit unterschiedlichen Winkeln aus einer geraden Gerinnestrecke untersucht wurden. Dabei wurde bei kontinuierlicher Strömung Sand als Sediment in das Modell zugegeben und dessen Verteilung auf die beiden Gerinnearme beobachtet und ausgewertet. Durch diese Untersuchungen wurde festgestellt, dass bei gleich großer Durchflussaufteilung in einem Verzweigungsgerinne der Großteil des Geschiebes dem Seitenarm zustrebt. Dieses Verhalten des Geschiebes in verzweigten Gerinnen wird in der Literatur oft als Bulle-Effekt bezeichnet. In der Literatur existieren nur wenige Vergleiche zwischen den Sedimenttransportergebnissen des gegenständlichen Modells von Bulle und numerischen 3-D-HN-Modellen. Die bisher nicht erfolgte Bewertung der Eignung von 3-D-MN-Simulationen hinsichtlich der numerischen Nachbildung der Geschiebetransportprozesse im Bulle-Modell sowie in Verzweigungsgerinnen allgemein stellt eine Forschungslücke dar, die in Kostić und Theobald [4] sowie in dieser Publikation vertieft behandelt wird. Eine detaillierte Literaturrecherche zu diesem Thema ist Kostić [5] zu entnehmen.

Die gegenständlichen Gerinneverzweigungsmodelle von Bulle [1] wurden numerisch in einem hydrodynamischen bzw. morphodynamischen Modell nachgebildet und die Resultate in zwei Publikationen der Autoren dieser Veröffentlichung [3], [4] vorgestellt. Durch den Ergebnisvergleich der numerischen und gegenständlichen Modellversuche bezüglich der Anlandungsform des Geschiebes, der Geschiebeaufteilungen auf die Gerinnebereiche sowie des zeitlichen Verlaufs der Geschiebeablagerungen konnte die numerische Abbildbarkeit der gegenständlichen Untersuchungen von Bulle belegt und damit die prinzipielle Eignung von 3-D-MN-Simulationsverfahren zur Nachbil-

Kompakt

- Geschiebetransportprozesse in Verzweigungsgerinnen sind durch 3-D-morphodynamisch-numerische Modellierung gut abbildbar
- Relatives Rechennetz (y^+ -Parameter) beeinflusst Auswahl der Geschiebetransportformel, das LES-Turbulenzmodell ist auch für ein relativ grobes Rechennetz ($y^+ = \text{ca. } 150$) anwendbar.
- Wirkung einfacher geometrischer Strukturen (wie z. B. Leitwände) kann im numerischen Modell gut durch „Baffles“ nachgebildet werden.

dung von Geschiebetransportprozessen unter komplexen Randbedingungen gezeigt werden.

In dieser Publikation werden die Ergebnisse weiterer numerischer Untersuchungen vorgestellt, die auf den an der Versuchsanstalt für Wasserbau der Universität Kassel durchgeföhrten morphodynamischen Versuchen an einem großräumigen gegenständlichen Verzweigungsgerinne basieren und u. a. auch Maßnahmen zur Verhinderung von Geschiebeanlandungen im Seitenarm beinhalten. Die Verzweigungsgerinne von Bulle und der Universität Kassel unterscheiden sich in Größe, Modellaufbau, verwendeter Sedimentart und Implementierung der Wasserzuge, weshalb für deren numerische Nachbildung unterschiedliche Modellparameter verwendet wurden. Analog zu den numerischen Untersuchungen des Modells von Bulle wurden für das Verzweigungsgerinne der Universität Kassel detaillierte Ergebnisvergleiche zwischen den numerischen und gegenständlichen Versuchen bezüglich Geschiebeaufteilung, Anlandungsformen und zeitlicher Entwicklung des Geschiebetransportes durchgeführt. Ziel dieser Forschung ist der Erkenntnisgewinn zu numerischen Geschiebetransportsimulationen mittels Geschiebetransportformeln und die Entwicklung sowie Überprüfung von Empfehlungen zu 3-D-MN-Simulationen für komplexe Strömungsbedingungen.

Die in dieser Arbeit beschriebenen numerischen Untersuchungen wurden mit der Software FLOW-3D des Herstellers Flow Science [2] durchgeföhr.

2 Das Verzweigungsgerinnemodell der Universität Kassel

In der Versuchsanstalt für Wasserbau der Universität Kassel wurden umfangreiche Untersuchungen an einem großräumigen Gerinneverzweigungsmodell durchgeföhr, um einen vertieften Einblick in das Geschiebeverhalten an Verzweigungen zu erhalten sowie 3-D-MN-Simulationen von Geschiebetransport bewerten und validieren zu können. Die Ergebnisse der an dem Verzweigungsgerinne der Universität Kassel durchgeföhrten gegenständlichen Untersuchungen sind in Ren [7] ausführlich beschrieben und wurden zum Vergleich mit den in dieser Arbeit beschriebenen Ergebnissen des numerisch nachgebildeten Modells verwendet.

Das gegenständliche Modell der Universität Kassel besteht aus einer 30°-Verzweigung, die von einem geraden Kanal abführt. Es hat eine Gesamtlänge von 13,2 m und eine Kanalbreite von 0,8 m und ist damit etwa viermal so groß wie das Modell von Bulle. Das Gerinne wurde aus Ziegelsteinen und einer feinen Mörtelbeschichtung aufgebaut und weist kein Längsgefölf auf. Für die numerischen Untersuchungen wurde daher eine Sohlenrauheit von 0,08 mm gewählt. Eine Vielzahl von Versuchen mit unterschiedlichen Wassertiefen und Durchflussaufteilungen wurde im gegen-

ständlichen Modell durchgefölf; die hier dargestellten Simulationen beziehen sich auf Untersuchungen mit Wassertiefen von $h = 0,1$ m und $h = 0,2$ m. **Bild 1** zeigt eine Darstellung des Verzweigungsgerinnes.

In den gegenständlichen Untersuchungen wurden die zwei Sedimentarten Kunststoffgranulat und Quarzsand verwendet. Das Kunststoffgranulat hat eine Dichte von $\rho = 1\,055\text{ kg/m}^3$ und einen mittleren Korndurchmesser von $d = 2\text{ mm}$, wohingegen die Dichte des Quarzsandes $\rho = 2\,650\text{ kg/m}^3$ und der mittlere Korndurchmesser $d = 0,55\text{ mm}$ betragen. Da die Modellsohle aus festem, nicht erodierbarem Material besteht, wurde das gesamte Sediment am Modellzulauf extern als Schwebstoff durch eine oberhalb des Wasserspiegels befestigte Sedimentzubagabe einrichtung von außen in das Modell eingebracht. Die Dauer der Untersuchungen mit Kunststoffgranulat betrug vier Stunden, während die Modellversuche mit Quarzsand zwölf Stunden dauerten. Die Bestimmung der Geschiebeablagerungen wurde mittels Laserscan und volumetrischer Methode durchgefölf.

Die Gesamtabflüsse im Modell betragen für die Wassertiefen von $h = 0,1$ m bzw. $h = 0,2$ m bei den Versuchen mit Kunststoffgranulat $Q = 12\text{ l/s}$ bzw. $Q = 24\text{ l/s}$ und bei der Verwendung von Quarzsand $Q = 30\text{ l/s}$ bzw. $Q = 68\text{ l/s}$. Bei den Untersuchungen ohne Geschiebeabweisungsstrukturen wurde für beide Abflüsse eine Abflussaufteilung von 50 : 50 sowie 70 : 30 zwischen geradem Gerinnearm und abzweigendem Seitenarm ($Q_g : Q_s = 50 : 50$ bzw. $Q_g : Q_s = 70 : 30$) numerisch untersucht. Pro Sedimentart wurden daher vier verschiedene Varianten betrachtet (Abschnitt 3.1). Zusätzlich wurden insgesamt fünf Varianten mit Geschiebeabweisungsstrukturen numerisch untersucht (Abschnitt 3.2).

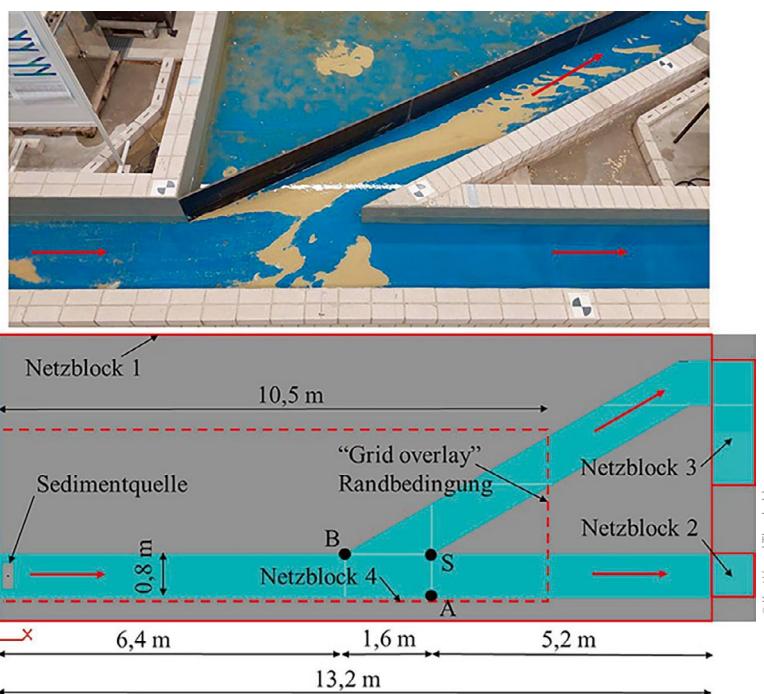


Bild 1: Darstellung des gegenständlichen Verzweigungsgerinnes [8] (oben) und Aufbau des numerischen Modells des Verzweigungsgerinnes der Universität Kassel (unten)

Für die numerische Simulation des Verzweigungsgerinnes der Universität Kassel wurden die durch die Nachbildung des Bulle-Modells gewonnenen Erkenntnisse genutzt und die numerischen Parameter entsprechend übernommen. Bei der 3-D-MN-Simulation des Verzweigungsgerinnes von Bulle wurden die zum gegenständlichen Modell ähnlichen Ergebnisse mit der Geschiebetransportgleichung nach Van Rijn [9] und der Verwendung des LES-Turbulenzmodells [10] (LES: Large Eddy Simulation) erzeugt. Die Ergebnisse deuten an, dass das LES-Turbulenzmodell für die Nachbildung des Geschiebetransports besser geeignet ist als auf den Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) basierende Turbulenzmodelle. Die morphodynamischen Ergebnisse mit dem LES-Turbulenzmodell zeigen sogar für ein relativ grobes Rechennetz eine deutlich bessere Übereinstimmung mit dem gegenständlichen Modell als Simulationen mit dem RNG-Modell [11] (RNG: Renormalized Group).

Die verglichen mit dem Modell von Bulle deutlich größeren Abmessungen des Verzweigungsmodells der Universität Kassel führen zu längeren Simulationszeiten bei der numerischen Berechnung. Daher wurde das Modell nach der hydrodynamischen Simulation auf den Bereich verkürzt, in dem sich die Sedimente in den gegenständlichen Modellversuchen absetzten (Netzblock 4 in **Bild 1**) und für die morphodynamischen Simulationen neu gestartet. Am neu definierten Modellausschnitt wurde eine Grid-overlay-Randbedingung verwendet, die die hydrodynamischen Größen wie Druck und Geschwindigkeit an diesem Rand vom vorigen Modell (Netzblock 1) übernimmt.

Das Rechennetz des numerischen Modells der Untersuchungen mit Kunststoffgranulat wurde so gewählt, dass die erste bodennahe Zelle einen y^+ -Parameter [3] in der gleichen Größenordnung wie der y^+ -Parameter im numerischen Modell des Bulle-Verzweigungsgerinnes aufweist. Das Berechnungsgitter hat eine Auflösung von 0,02 m in y -Richtung mit allmählicher Vergrößerung bei zunehmender Distanz zum Hauptkanal, eine Diskretisierung von 0,04 m in x -Richtung mit zusätzlicher Verfeinerung in der Nähe der Verzweigung sowie eine flächendeckende vertikale Auflösung von 0,02 m. Die y^+ -Parameter übersteigen bei diesem Berechnungsnetz den Wert von 100 nicht.

Die Untersuchungen mit Quarzsand wurden mit höherem Durchfluss und für längere Versuchsdauern durchgeführt, als

es für die Untersuchungen mit Kunststoffgranulat der Fall war. Aufgrund des höheren Durchflusses unter Beibehaltung des gleichen Wasserstandes wie bei den Untersuchungen mit Kunststoffgranulat musste das Rechennetz der Untersuchungen mit Quarzsand feiner als bei den Untersuchungen mit Kunststoffgranulat sein. Für die Versuche mit Quarzsand wurde das Rechennetz in z -Richtung mit drei Netzebenen mit einer Dicke von 0,01 m im sohennahen Bereich zusätzlich verfeinert. Das feinere Rechennetz sowie die längere Versuchsdauer bei den Quarzsanduntersuchungen führten zu enormen Rechenzeiten. Aus den oben beschriebenen Gründen wurde für die Untersuchungen mit Quarzsand ein größeres relatives Rechennetz (Rechennetz im Verhältnis zu dem y^+ -Wert) ausgewählt, bei dem der y^+ -Parameter einen Wert von bis zu 150 aufweist.

Es wird bei der Auswertung der Geschiebeablagerungen zwischen drei Bereichen unterschieden. 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 abzweigenden Seitenarm und das Geschiebe, welches keinen der beiden Querschnitte passiert hat, auf den Zulaufbereich. Diese räumliche Einteilung der Bereiche wurde für die gegenständlichen und numerischen Untersuchungen gleichermaßen durchgeführt.

3 Ergebnisse der numerischen Untersuchungen

3.1 Modell des Verzweigungsgerinnes ohne Geschiebeabweisungsstrukturen

Untersuchungen mit Kunststoffgranulat

Das verwendete Kunststoffgranulat hat einen relativ großen Korndurchmesser bei sehr geringer Dichte und bewegt sich daher auf eine andere Weise als Quarzsand. Die für die Simulation mit Kunststoffgranulat verwendeten numerischen Parameterwerte entsprechen fast vollständig denen der numerischen Untersuchung des Bulle-Modells aus [4] mit Quarzsand. Lediglich der Abhebekoeffizient, ein Parameter zur Beeinflussung des Übergangs von Geschiebe in Schwebstoff, wurde für die Simulation mit Kunststoffgranulat nach entsprechender Analyse modifiziert, da er einen starken Einfluss auf die Bewegung des

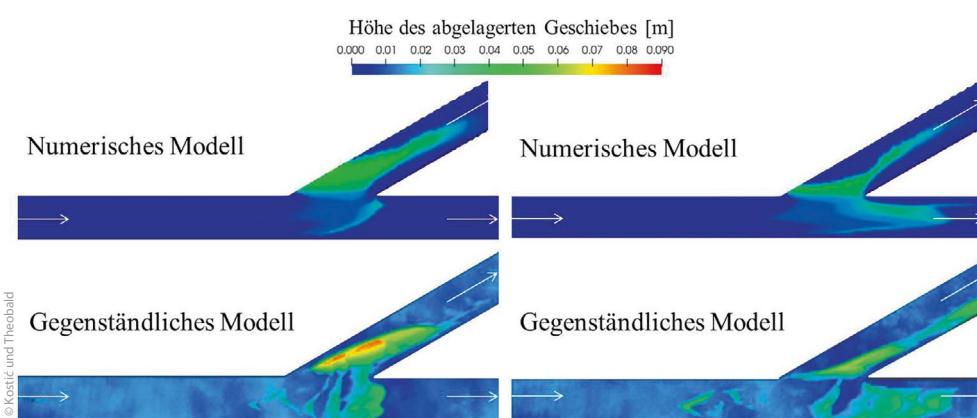


Bild 2: Ergebnisse von numerischer Simulation (oben) und gegenständlichem Modellversuch (unten) für Kunststoffgranulat mit Wassertiefe $h = 0,1$ m und $Q_g : Q_s = 50 : 50$ (links) und $Q_g : Q_s = 70 : 30$ (rechts) nach 4 Stunden

Tabelle 1: Prozentuale Geschiebeaufteilung auf den Bereich vor der Verzweigung, den geraden Arm und den Seitenarm für die numerischen und gegenständlichen Untersuchungen (Kunststoffgranulat, Wassertiefe $h = 0,1$ m und $h = 0,2$ m, Versuchsdauer 4 Stunden) (Quelle: Kostić und Theobald)

Modell	Wassertiefe [m]	Durchflussaufteilung $Q_g : Q_s$ [%]	Sedimente vor der Verzweigung [%]	Sedimente im geraden Arm [%]	Sedimente im Seitenarm [%]	Verhältnis Seitenarm/Gerader Arm [%]
Numerisch	0,1	50 : 50	18,7	2,7	78,6	96,7/3,3
Gegenständlich	0,1	50 : 50	13,5	8,3	78,2	90,4/9,6
Numerisch	0,1	70 : 30	23,6	26,7	49,7	65,1/34,9
Gegenständlich	0,1	70 : 30	10,4	34,9	54,7	61,0/39,0
Numerisch	0,2	50 : 50	39,4	0,7	59,9	98,8/1,2
Gegenständlich	0,2	50 : 50	38,0	1,4	60,6	97,7/2,3
Numerisch	0,2	70 : 30	44,2	9,7	46,2	82,6/17,4
Gegenständlich	0,2	70 : 30	61,7	5,6	32,7	85,4/14,6

Kunststoffgranulats und einen geringeren Einfluss auf die Bewegung des Quarzsandes ausübt.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen, die auf der Geschiebetransportgleichung nach Van Rijn unter Verwendung eines Abhebekoeffizienten von 0,2 basieren, mit den Ergebnissen der gegenständlichen Modellversuche verglichen.

In **Bild 2** sind die numerischen und gegenständlichen Modellergebnisse bei einer Wassertiefe von $h = 0,1$ m und einem Abfluss von $Q = 12$ l/s für eine gleichmäßige Durchflussaufteilung ($Q_g : Q_s = 50 : 50$) auf die zwei Gerinnearme und für eine Durchflussaufteilung von 70 % des Durchflusses im geraden und 30 % im abzweigenden Arm nach einer Versuchsdauer von 4 Stunden dargestellt.

Mit einer Wassertiefe von $h = 0,2$ m und einem Durchfluss von $Q = 24$ l/s wurden analoge Untersuchungen durchgeführt.

Tabelle 1 stellt für die beiden Abflussaufteilungen ($Q_g : Q_s = 50 : 50$ und $70 : 30$) die prozentualen Geschiebeaufteilungen auf die verschiedenen Gerinnebereiche bei Wassertiefen von $h = 0,1$ m und $h = 0,2$ m dar.

Zwischen den Ergebnissen des numerischen und gegenständlichen Modells sind jeweils ähnliche prozentuale Verteilungen der Geschiebeablagerungen in den einzelnen Gerinnebereichen erkennbar (**Tabelle 1**). Darüber hinaus zeigt **Bild 2** bei optischem Ergebnisvergleich des numerischen und des gegenständlichen Modells Geschiebeablagerungen in ähnlichen Bereichen des Verzweigungsgerinnes. Die gegenständlichen Modelle weisen jedoch vor der Verzweigung geringere Geschiebeablagerungen und im geraden Arm höhere Geschiebeablagerungen auf, was darauf zurückzuführen ist, dass sich das Sediment in den gegenständlichen Modellen in Wellen bewegt und absetzt [7]. Dieses Verhalten konnte in den 3-D-MN-Simulationen aufgrund der Formeln für den Geschiebetransport, die die mittlere Geschiebebewegung und nicht die Bewegung der einzelnen Sedimentkörner berechnen, nicht beobachtet werden.

Untersuchungen mit Quarzsand

Numerische Untersuchungen mit Quarzsand wurden für die Geschiebetransportformeln nach Van Rijn [9] und Nielsen [12]

durchgeführt, da im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse festgestellt wurde, dass der Transportansatz von Nielsen besser geeignet ist, um den Geschiebetransport für diese Untersuchungen nachzubilden.

Bild 3 links zeigt die numerischen und gegenständlichen Modellergebnisse mit der Geschiebetransportformel nach Van Rijn und Nielsen bei einer Wassertiefe von $h = 0,1$ m und einem Abfluss von $Q = 30$ l/s mit gleichmäßiger Durchflussaufteilung auf die zwei Gerinnearme nach einer Versuchsdauer von 12 Stunden. Es ist in den zwei numerischen sowie in dem gegenständlichen Modell ersichtlich, dass sich das Geschiebe größtenteils in den Seitenarm des Gerinnes absetzt. Des Weiteren wird deutlich, dass in dem gegenständlichen Modell ein geringer Anteil des Geschiebes im geraden Arm landet, was in den numerischen Untersuchungen nicht der Fall ist. Im rechten Abschnitt von **Bild 3** sind die Ergebnisse für eine Durchflussaufteilung von $70 : 30$ dargestellt, die einen deutlich erkennbaren Weitertransport des Geschiebes in den geraden Arm zeigen.

Bild 3 zeigt sehr ähnliche numerische und gegenständliche Ablagerungsformen bei Verwendung der Geschiebetransportformel nach Nielsen. Die mit dem Ansatz nach Van Rijn erzeugten Ergebnisse zeigen bezüglich der Form des Anlandungskörpers eine ähnliche Tendenz wie die gegenständlichen und numerischen Ergebnisse mit dem Ansatz von Nielsen, jedoch lagert sich ein geringerer Sedimentanteil im geraden Arm ab, was auf einen langsameren bzw. geringeren Geschiebetransport durch den Ansatz nach Van Rijn schließen lässt.

Tabelle 2 enthält jeweils für das gegenständliche und die zwei numerischen Modelle nach Van Rijn und Nielsen die prozentuale Geschiebeaufteilung auf die Gerinnebereiche für die beiden Durchflussaufteilungen (50 : 50 und 70 : 30) bei einer Wassertiefe von $h = 0,1$ m ($Q = 30$ l/s) sowie bei einer Wassertiefe von $h = 0,2$ m ($Q = 68$ l/s). Die im gegenständlichen Modell auftretende Geschiebeaufteilung wird für alle vier betrachteten numerischen Varianten deutlich besser durch den Ansatz nach Nielsen abgebildet als durch die Formel nach Van Rijn.

Die Werte der numerischen Parameter wurden bei der Modellierung des Verzweigungsgerinnes der Universität Kassel unter Anwendung des Transportansatzes nach Van Rijn

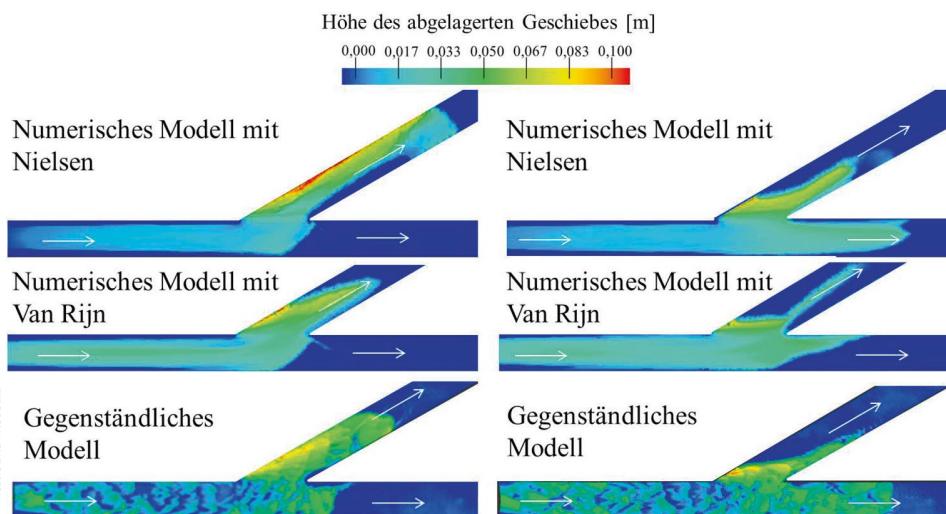


Bild 3: Ergebnisse von numerischer Simulation mit Nielsen (oben) und Van Rijn (Mitte) sowie gegenständlichem Modellversuch (unten) für Quarzsand mit Wassertiefe $h = 0,1$ m und $Q_g : Q_s = 50 : 50$ (links) und $Q_g : Q_s = 70 : 30$ (rechts) nach 12 Stunden

identisch zu denen bei der Nachbildung des Bulle-Gerinnes eingestellten Werten gewählt. Auch der im Verzweigungsgerinne der Universität Kassel untersuchte Quarzsand liegt mit einer mittleren Korngröße von 0,55 mm in einem ähnlichen Bereich wie der im Bulle-Gerinne untersuchte Quarzsand mit einem mittleren Korndurchmesser von 0,5 mm. Lediglich die über den y^+ -Parameter ausgedrückte relative Netzauflösung unterscheidet sich zwischen den beiden Modellen mit Werten zwischen 50 und 100 im Bulle-Gerinne und 100 und 150 im Verzweigungsgerinne der Universität Kassel deutlich. Da für die Modellierung des Bulle-Gerinnes der Transportansatz nach Van Rijn und für die Modellierung des Verzweigungsgerinnes der Universität Kassel der Transportansatz nach Nielsen die besten Ergebnisse liefert, liegt die Annahme nahe, dass die über den y^+ -Parameter definierte Auflösung des Rechennetzes einen maßgebenden Einfluss auf die Wahl eines geeigneten Transportansatzes hat.

3.2 Modell mit Geschiebeabweisungsstrukturen

Die bereits beschriebenen Untersuchungen zur Sedimentbewegung in Gerinneverzweigungen zeigen konsistent, dass sich der überwiegende Teil des Geschiebes im Seitenarm der Verzweigung ablagert. Es ist in der Wasserbaupraxis generell von Interesse, Maßnahmen gegen Geschiebeablagerungen im Seitenarm, besonders bei seitlich ausgerichteten Wasserentnahmewerken, zu erforschen, um die Ableitung sedimentfreien Wassers zur Stromerzeugung oder Trinkwassergewinnung gewährleisten zu können. In Ren [7] wurden verschiedene Maßnahmen gegen Geschiebeablagerungen im Seitenarm im gegenständlichen Verzweigungsgerinne der Universität Kassel untersucht. Einige dieser Maßnahmen wurden numerisch nachgebildet und sind nachfolgend beschrieben.

Das numerische Modell wurde unverändert übernommen und lediglich um die zu betrachtenden Geschiebeabweisungsstrukturen erweitert. Bei den Untersuchungen mit Kunststoff-

Tabelle 2: Prozentuale Geschiebeaufteilung auf den Bereich vor der Verzweigung, den geraden Arm und den Seitenarm für die numerischen und gegenständlichen Untersuchungen (Quarzsand, Wassertiefe $h = 0,1$ m und $h = 0,2$ m, Versuchsdauer 12 Stunden) (Quelle: Kostić und Theobald)

Modell	Wassertiefe [m]	Durchflussaufteilung $Q_g : Q_s$ [%]	Sedimente vor der Verzweigung [%]	Sedimente im geraden Arm [%]	Sedimente im Seitenarm [%]	Verhältnis Seitenarm/Gerader Arm [%]
Numerisch Van Rijn	0,1	50 : 50	62,7	0,3	37,0	99,2/0,8
Numerisch Nielsen	0,1	50 : 50	29,6	0,2	70,2	99,7/0,3
Gegenständlich	0,1	50 : 50	30,9	10,4	58,8	85,0/15,0
Numerisch Van Rijn	0,1	70 : 30	70,4	9,8	19,8	66,9/33,1
Numerisch Nielsen	0,1	70 : 30	34,9	26,1	39,0	59,9/40,1
Gegenständlich	0,1	70 : 30	38,2	30,1	31,7	51,3/48,7
Numerisch Van Rijn	0,2	50 : 50	83,5	0,0	16,5	100,0/0,0
Numerisch Nielsen	0,2	50 : 50	38,1	0,1	61,8	99,8/0,2
Gegenständlich	0,2	50 : 50	44,9	0,2	54,9	99,6/0,4
Numerisch Van Rijn	0,2	70 : 30	88,6	0,6	10,8	94,7/5,3
Numerisch Nielsen	0,2	70 : 30	55,1	13,9	30,9	69,0/31,0
Gegenständlich	0,2	70 : 30	53,5	13,7	32,8	70,5/29,5

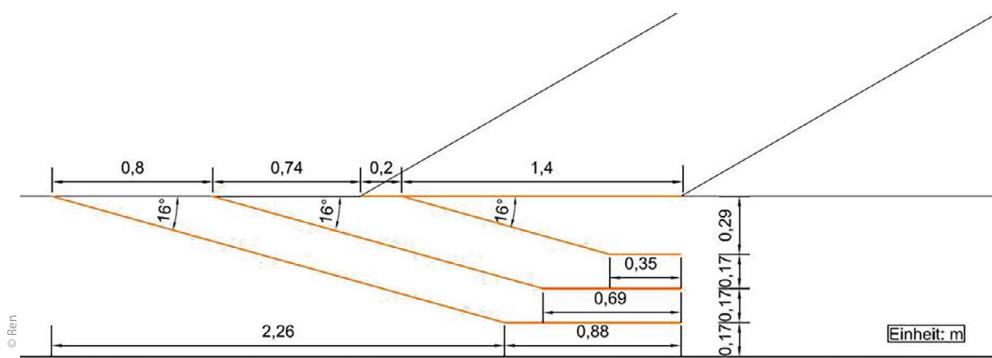


Bild 4: Abweisungsstrukturen mit drei Leitwänden nach Ren [7]

granulat wurde daher die Geschiebetransportgleichung nach Van Rijn unter Verwendung eines Abhebekoeffizienten von 0,2 und bei den Versuchen mit Quarzsand die Geschiebetransportgleichung nach Nielsen verwendet. Die geometrischen Einbauten wurden im numerischen Modell mithilfe von sogenannten Baffles realisiert, welche die Rechenzellen blockieren oder durch eine definierte Porosität teilweise durchströmbar machen.

Die für diese Arbeit relevanten Abweisungsstrukturen von Ren setzen sich aus einem System von Leitwänden zusammen (**Bild 4**), wobei die gewählte Anzahl der Leitwände vom Geschiebematerial (Kunststoffgranulat, Quarzsand) und der Wassertiefe abhängig ist. Alle Varianten enthalten eine Leitwand am Beginn des Seitenarms, die in Fließrichtung des geraden Arms ausgerichtet ist und dadurch den Seitenarm in Sohlennähe von dem restlichen Modell trennt. Je nach Variante sind eine, zwei oder drei weitere Leitwände zunächst schräg und anschließend parallel zum Hauptkanal angeordnet. Die Höhe der Leitwände entspricht 40 % der Wassertiefe, also 0,04 m für das Modell mit einer Wassertiefe von $h = 0,1$ m und 0,08 m bei einer Wassertiefe von $h = 0,2$ m.

Die Untersuchungen mit Abweisungsstrukturen wurden ausschließlich für einen gleichmäßig aufgeteilten Abfluss ($Q_g : Q_s = 50 : 50$) durchgeführt.

Mit Kunststoffgranulat wurden drei Varianten numerisch untersucht, deren Ergebnisse genauer in Kostić, Ren und Theobald [6] dargestellt sind. Für die Wassertiefe von $h = 0,1$ m ($Q = 12$ l/s) wurden Abweisungsstrukturen mit einer sowie drei

schrägen Leitwänden betrachtet. Für die Wassertiefe von $h = 0,2$ m ($Q = 24$ l/s) wurde eine schräge Leitwand untersucht.

Neben dem Kunststoffgranulat kam Quarzsand für die Untersuchungen mit den Geschiebeabweisungsstrukturen zum Einsatz (**Bild 5**). Bei einer Wassertiefe von $h = 0,1$ m und drei eingesetzten Leitwänden wird der Großteil des Geschiebes in den geraden Arm umgeleitet und lediglich ein geringer Anteil lagert sich im Seitenarm ab. Um eine ähnlich gute Umlenkung bei einer Wassertiefe von $h = 0,2$ m zu erreichen, sind nur zwei Leitwände notwendig.

Die numerischen und gegenständlichen Ergebnisse aus **Bild 5** zeigen ähnliche Geschiebeablagerungsformen, dennoch weist das numerische Modell mehr Geschiebe im geraden Arm und weniger vor der Verzweigung auf als das gegenständliche Modell. Die Geschiebeablagerungsform für $h = 0,1$ m der zwei Modelle ist nahezu identisch. Im geraden Arm, unterstrom der Verzweigung, ist für beide Modelle das Geschiebe über die ganze Gerinnebreite abgelagert. Ebenfalls sind auf der rechten Seite im Seitenarm geringe Geschiebeablagerungen für beide Modellvarianten erkennbar. Bei beiden Modellen mit $h = 0,2$ m zeigen sich sehr geringe Geschiebeablagerungen auf der rechten Seite des Seitenarmes sowie Geschiebeablagerungen am Anfang des geraden Armes. Dazu ist zu bemerken, dass im numerischen Modell das Geschiebe auf der linken Seite des geraden Armes weitergewandert ist als es im gegenständlichen Modell der Fall war.

Tabelle 3 listet zusammenfassend die prozentuale Geschiebeaufteilung auf die verschiedenen Gerinnebereiche für die vorgestellten Modellvarianten mit Abweisungsstrukturen auf.

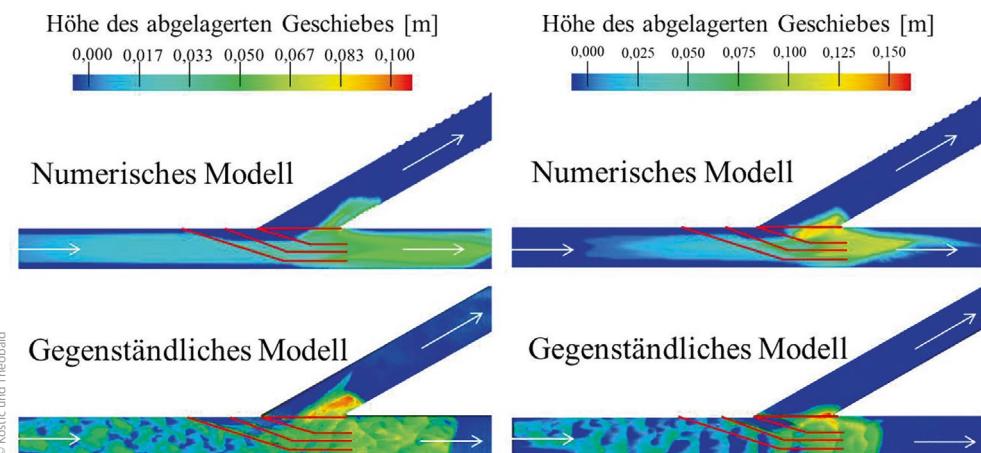


Bild 5: Geschiebeablagerungen im numerischen (oben) und gegenständlichen (unten) Modell mit Abweisungsgeometrie (Kunststoffgranulat, drei schräge Leitwände, Wassertiefe $h = 0,1$ m (links) und $h = 0,2$ m (rechts) nach 6 Stunden)

Tabelle 3: Prozentuale Geschiebeaufteilung auf den Bereich vor der Verzweigung, den geraden Arm und den Seitenarm für die numerischen und gegenständlichen Untersuchungen mit Abweisungsstrukturen (Kunststoffgranulat nach 6 Stunden und Quarzsand nach 12 Stunden) (Quelle: Kostić und Theobald)

Modell	Sedimentmaterial	Wasser-tiefe [m]	Anzahl der Leitwände	Sedimente vor der Verzweigung [%]	Sedimente im geraden Arm [%]	Sedimente im Seitenarm [%]	Verhältnis Seitenarm/Gerader Arm [%]
Numerisch	Kunststoff	0,1	1	29,5	37,7	32,8	46,5/53,5
Gegenständlich	Kunststoff	0,1	1	18,1	65,3	16,6	20,3/79,7
Numerisch	Kunststoff	0,1	3	26,5	73,5	0,0	0,0/100,0
Gegenständlich	Kunststoff	0,1	3	22,3	77,7	0,0	0,0/100,0
Numerisch	Kunststoff	0,2	1	45,5	54,5	0,0	0,0/100,0
Gegenständlich	Kunststoff	0,2	1	66,6	29,9	3,9	11,5/88,5
Numerisch	Quarzsand	0,1	3	39,6	52,5	8,0	13,2/86,8
Gegenständlich	Quarzsand	0,1	3	46,1	39,8	14,1	26,2/73,8
Numerisch	Quarzsand	0,2	2	49,5	40,2	10,4	20,6/79,4
Gegenständlich	Quarzsand	0,2	2	65,5	30,1	4,7	13,5/86,5

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit Kunststoffgranulat zeigen, dass bei einer Wassertiefe von $h = 0,1$ m drei Leitwände nötig sind, um den Sedimenteintrag in den Seitenarm zu verhindern. Liegt eine Wassertiefe von $h = 0,2$ m vor, bedarf es hingegen nur einer Leitwand für die nahezu vollständige Umlenkung des Geschiebes in den geraden Arm. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei dem Modell mit einer Wassertiefe von $h = 0,1$ m im Vergleich zu dem Modell mit einer Wassertiefe von $h = 0,2$ m höhere Schubspannungen vorliegen.

Insgesamt weisen die Untersuchungsergebnisse zur Geschiebeabweisung von den numerischen und gegenständlichen Modellvarianten eine gute Ähnlichkeit auf. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass Baffles zur Nachbildung einfacher geometrischer Strukturen in Flow-3D geeignet sind.

4 Fazit

In der vorgestellten Arbeit erfolgte die Analyse der 3-D-MN-Simulationsverfahren anhand der numerischen Nachbildung von Untersuchungen, die an einem großräumigen gegenständlichen Verzweigungsgerinne an der Universität Kassel für die zwei Sedimentarten Kunststoffgranulat und Sand durchgeführt wurden. Dabei wurden die numerischen Ergebnisse durch den Vergleich der Form des abgelagerten Geschiebes, der Geschiebeaufteilungen auf die Gerinnebereiche sowie des zeitlichen Verlaufes des Geschiebetransportes mit gegenständlichen Modelluntersuchungen bewertet. Bei den Untersuchungen wurden unterschiedliche Strömungsverhältnisse (Wassertiefen, Durchflussmengen) und Durchflussaufteilungen berücksichtigt. Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung der numerischen Simulationen mit den gegenständlichen Untersuchungsergebnissen.

Es wurden zudem Maßnahmen gegen Geschiebeablagerungen im Seitenarm von Verzweigungsgerinnen numerisch untersucht. Die Konstruktion von Leitwänden im Sohlenbereich ist eine effiziente Maßnahme, das Geschiebe in den geraden Gerinnearm umzuleiten und eine Ablagerung im Seitenarm zu redu-

zieren resp. zu verhindern. Die Leitwände im numerischen Modell wurden mittels Baffles realisiert und die damit erzeugten Ergebnisse weisen eine gute Ähnlichkeit zu den Ergebnissen des gegenständlichen Modells auf. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass einfache Strukturen (wie z. B. Leitwände) numerisch durch Baffles nachgebildet werden können.

In einer früheren Forschung der Autoren ([3] und [4]) wurde ein kleineres Verzweigungsgerinne im 3-D-MN-Modell nachgebildet. Dabei wurde festgestellt, dass das LES-Turbulenzmodell besser dazu geeignet ist, den Geschiebetransport nachzubilden, als die auf RANS basierenden Turbulenzmodelle. In der hier dargestellten Forschung wurde gezeigt, dass das LES-Turbulenzmodell auch für ein relativ grobes Rechennetz ($y^+ = \text{ca. } 150$) die Geschiebetransportprozesse nachbilden kann. Gesamthaft ist festzustellen, dass das relative Rechennetz (ausgedrückt über den y^+ -Parameter) einen bedeutenden Einfluss auf die Auswahl der Geschiebetransportformel ausübt. Beispielsweise ist für ein feineres Rechennetz ($50 < y^+ < 100$) die Transportformel von Van Rijn und für ein gröberes Rechennetz ($100 < y^+ < 150$) die Transportformel von Nielsen besser für 3-D-MN-Simulationen von Geschiebetransport geeignet.

Autoren

Dr.-Ing. Tino Kostić

(heute: Versuchsanstalt Obernach, TU München)

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] Flow Science Inc. (Hrsg.): FLOW-3D v12.0 User Manual. 2019.

- [3] Kostić, T.; Theobald, S.: 3-D-hydrodynamisch-numerische Analyse der Strömungsverhältnisse in Verzweigungsgerinnen. In: WasserWirtschaft 111 (2021), Heft 12, S. 32-38.
- [4] Kostić, T.; Theobald, S.: Simulation des Geschiebetransports in Verzweigungsgerinnen mit 3-D-morphodynamischen Modellen. In: WasserWirtschaft 111 (2021), Heft 12, S. 39-46.
- [5] Kostić, T.: 3-D-hydrodynamisch-numerische Untersuchungen des Geschiebetransports in Verzweigungsgerinnen. In: Kasseler Wasserbau-Mitteilungen (2023), Heft 24.
- [6] Kostić, T.; Ren, Y.; Theobald, S.: 3-D-CFD analysis of bedload transport in channel bifurcations. In: Journal of Hydroinformatics 26 (2024), Nr. 2, S. 480-493 (doi.org/10.2166/hydro.2024.175).
- [7] Ren, Y.: Morphodynamische Analyse zum Geschiebetransportverhalten in gegenständlichen Verzweigungsgerinnen. In: Kasseler Wasserbau-Mitteilungen (2024), Heft 25.
- [8] Ren, Y.; Träbing, K.; Theobald, S.: Einflüsse auf die Geschiebeaufteilung an spitzwinkligen Gerinneverzweigungen. In: WasserWirtschaft 114 (2024), Heft 11, S. 10-17.
- [9] Van Rijn, L. C.: Sediment transport, part I: bed load transport. In: Journal of hydraulic engineering 110 (1984), Nr. 10, S. 1 431-1 456.
- [10] Smagorinsky, J.: General Circulation Experiments with the Primitive Equations. In: Monthly Weather Review 91 (1963), Heft 3.
- [11] Yakhot, V.; Orszak, S. A.: Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic Theory. In: J. Sci. Comput. (1986), Heft 1, S. 3-51.
- [12] Nielsen, P.: Coastal bottom boundary layers and sediment transport. Advanced Series on Ocean Engineering (1992), Vol. 4 (doi.org/10.1142/1269).

DOI dieses Beitrags: <http://doi.org/10.1007/s35147-024-2413-x>



Geschiebetransport



Patt, H.; Speerli, J.; Gonsowski, P.: Feststofftransport, Gewässerbettdynamik und Fließgewässertypologie. In: Wasserbau, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021. <https://sn.pub/f28z9m>

Müller, F.; Ettmer, B. et al.: Kolkexperimente an Brückenpfeilern unter Sedimenttransportbedingungen mit Polystyrolgranulat. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 5/2021. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021. <https://sn.pub/g73ad8>

NACHHALTIGE INDUSTRIE
Forschung | Technologie | Wirtschaft

WISSEN UMSETZEN.

Begrenzte Ressourcen und die Verantwortung für die notwendige **Transformation zu einer nachhaltigen Industriegesellschaft** sind die wichtigen Themen unserer Zeit. Nachhaltige Industrie beleuchtet umfassend die Nachhaltigkeit aus dem Blickwinkel der Technik für die deutsche Industrie. Branchenübergreifend zeigt sie, wie Prozesse ressourcenschonend gestaltet und dadurch die Wirtschaftlichkeit und die Zukunftsfähigkeit der Unternehmen gesteigert werden. **Erfahren Sie mehr!**

JETZT kostenlos TESTEN!

www.meinfachwissen.de/nachhaltige-industrie

deepbluebyyou Bildberbär