

3-D-hydrodynamisch-numerische Analyse der Strömungsverhältnisse in Verzweigungsgerinnen

Der Bereich von Gerinneverzweigungen ist durch komplexe Strömungsverhältnisse geprägt, die in aller Regel wesentlich durch Sekundärströmungen beeinflusst werden. Diese spezielle Strömungssituation ist für den Geschiebetransport an verzweigten Gerinnen von großer Bedeutung. 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 eine ausführliche Beschreibung der 3-D-HN-Modellierung sowie eine umfassende Analyse zu den Strömungsverhältnissen in Verzweigungsgerinnen. In einer zweiten Publikation wird die Simulation und Analyse des Geschiebetransports vorgestellt.

Tino Kostić und Stephan Theobald

1 Einführung

Die nachfolgend dargestellte Forschungsarbeit beschäftigt sich mit verschiedenen numerischen Versuchen 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 Anwendungsgrenzen 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 dieser Publikation erfolgt eine Analyse des Strömungsgeschehens im Bereich der Verzweigung unter Berücksichtigung der von Bulle verwendeten Randbedingungen sowie weitergehenden Sensitivitätsanalysen. Hierzu werden 3-D-HN-Modelle des Verzweigungsgerinnes erstellt und beispielsweise Untersuchungen mit varierenden Rechennetzen sowie Turbulenzmodellen durchgeführt. Fokus der zweiten Publikation [3] ist die Nachbildung des Geschiebetransportes anhand des optimierten numerischen Verzweigungsgerinne-modells.

In den Versuchen von Bulle wurden Gerinneverzweigungen mit verschiedenen Abzweigwinkeln analysiert. Das untersuchte Verzweigungsgerinne wies eine Länge von etwa 6,5 m mit einer Längsneigung von 0,3 % und eine Breite von 0,20 m auf. Der größte Teil der physikalischen Versuche fand bei einem Gesamtdurchfluss von $Q = 5 \text{ l/s}$ mit einer Durchflussaufteilung von 50 % je Gerinnearm statt. Ergänzend wurden einige Versuche mit einem Durchfluss von $Q = 10 \text{ l/s}$, Abzweigwinkeln von 30° bis 150° sowie einer veränderten Gerinnegeometrie durchgeführt. Die Wassertiefe im Modell betrug ca. 7 cm. Das Gerinne wurde aus Schalungsholz gebaut, weshalb eine Rauheit von 0,5 mm für das numerische Modell angenommen wurde. Die Randbedingungen und Ergebnisse der von Bulle durchgeföhrten Untersuchungen sind für das Gerinnemodell mit einem Abzweigwinkel von 30° am ausführlichsten dokumentiert (**Bild 1**). Die nachfolgend dargestellten numerischen Untersuchungen konzentrieren sich auf die Versuche mit einem Durchfluss von $Q = 5 \text{ l/s}$ bei gleich großer Durchflussaufteilung auf die beiden Gerinnearme sowie Abzweigwinkeln von 30°, 60° und 90°.

Kompakt

- Ein 3-D-hydrodynamisch-numerisches Modell ist geeignet für Simulation und Analyse der Strömungsverhältnisse in Verzweigungsgerinnen.
- Die Nachbildung aller geometrischen Strukturen des Zulaufbereiches im HN-Modells sowie die Wahl genauer Randbedingung sind wesentlich für die Genauigkeit der Modellierung.
- Sohlennahe Geschwindigkeiten führen überwiegend in den Seitenarm des Verzweigungsgerinnes.

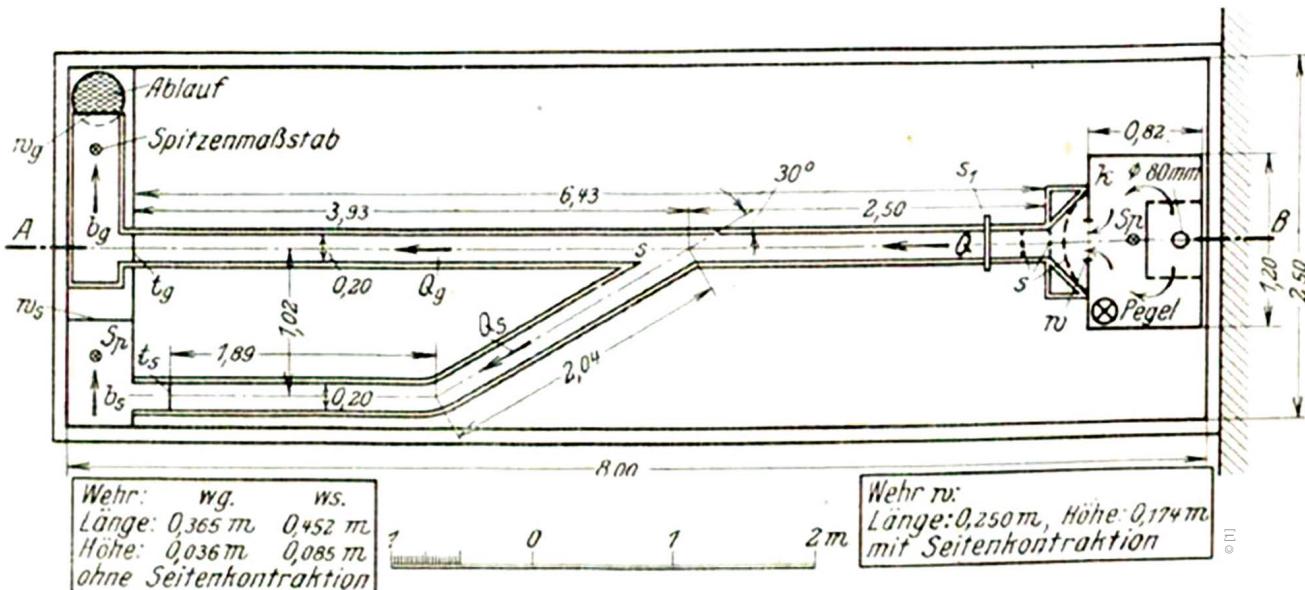


Bild 1: Schematische Darstellung des von Bulle untersuchten Verzweigungsgerinnes

2 Aufbau der hydrodynamisch-numerischen Modelle

2.1 Einführung in die 3-D-numerische Strömungsmechanik

Die numerischen Untersuchungen wurden mit der Software Flow-3-D des Herstellers Flow Science durchgeführt. Diese 3-D-numerische Simulationssoftware basiert auf einem strukturierten Berechnungsgitter (Finite Differenzen) und nutzt die Finite Volumen Methode. Die Modellgeometrie wird mit einem aus rechteckigen Zellen bestehenden numerischen Netz approximiert, wobei jede Zelle (Volumen) mit 8 Eckknoten abgegrenzt ist. In den Knoten werden die berechneten Werte für die maßgebenden Parameter, wie z. B. Druck und Geschwindigkeit, die notwendig für die Lösung der bestimmenden Gleichungen der Strömungsmechanik sind, hinterlegt. Mit Verringerung der Zellengröße werden auch die physikalischen Prozesse genauer nachgebildet. Gleichzeitig nimmt jedoch die Anzahl der Berechnungszellen und Berechnungsknoten deutlich zu, was kleinere Zeitschritte und schließlich höhere Rechenzeiten zur Folge hat [4]. Das Rechengitter muss daher so gewählt werden, dass die Strömungsprozesse ausreichend genau nachgebildet werden können, die Simulationsdauer aber einen akzeptablen Wert nicht überschreitet.

Durch Interpolation der Werte an den Knoten des Rechengitters können zur Ergebnisdarstellung beispielsweise Stromlinien oder Schnitte mit Geschwindigkeits- oder Druckverteilung erstellt werden. In Bild 2 sind Stromlinien einer numerischen Untersuchung im Bereich der Gerinneverzweigung bei gleich großer Durchflussaufteilung auf die beiden Gerinnearme mit Blick in Fließrichtung dargestellt. Das Bild zeigt je acht Stromlinien in Sohlennähe und acht oberflächennahe Stromlinien. Die Stromlinien sind in Abhängigkeit ihrer Ausrichtung an der Gerinneverzweigung eingefärbt. Es wird ersichtlich, dass fünf der oberen Stromlinien in den geraden Arm (rot) und drei in den Abzweigarm (blau) führen. Von den unteren Stromlinien zeigen

dagegen nur zwei in den geraden Arm und sechs in den Seitenarm. Dieser Sachverhalt zu den sohlnahen Stromlinien liefert schon eine Erklärung, warum der überwiegende Teil des Geschiebes in die seitliche Abzweigung transportiert wird.

2.2 Turbulenzmodellierung

Turbulenzmodelle dienen dazu, die vereinfachten Gleichungen der numerischen Strömungsmechanik mit Zusatzgleichungen zu schließen [5]. Im Rahmen der durchgeföhrten Untersuchungen wurden zur Bestimmung der Randbedingungen sowie für die anschließende Untersuchung des Sedimenttransports Versuche mit dem RNG- und dem LES-Turbulenzmodell (RNG: Renormalized Group, LES: Large Eddy Simulation) durchgeföhr.

Ein Ansatz zur Simulation dreidimensionaler Strömungsprozesse basiert auf der Vereinfachung der Navier-Stokes-Gleichun-

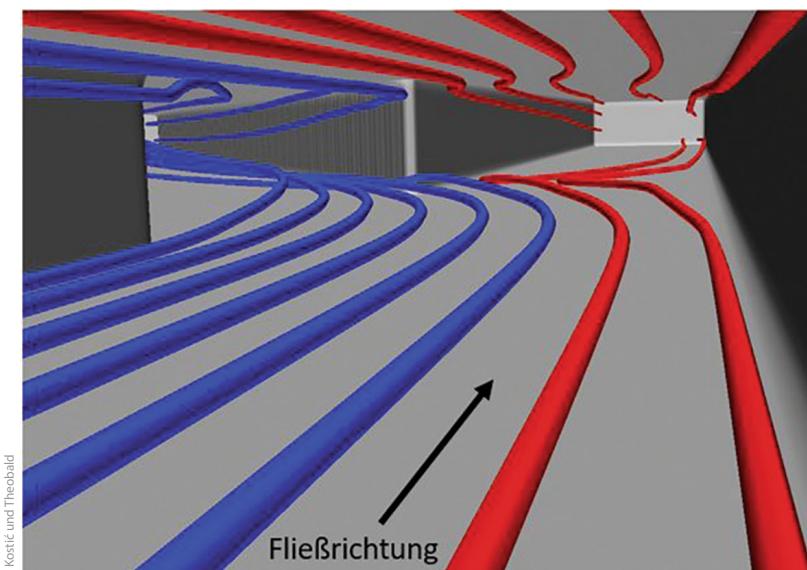


Bild 2: Darstellung der Stromlinien im Verzweigungsbereich des numerischen Modells mit 30° -Abzweigwinkel

gen durch ihre zeitliche Mittelung unter Anwendung der sogenannten Reynolds-Mittelung. Dabei werden die turbulenzbehafteten Strömungsparameter (Geschwindigkeit, Druck) als zeitlicher Mittelwert sowie zugehörige Varianz um diesen Mittelwert verstanden. Bei der Reynolds-Mittelung entstehen die RANS-Gleichungen (Reynolds Averaged Navier-Stokes), die einen neuen Term, den sogenannten Reynolds-Spannungstensor, zur Folge haben. Die zusätzlichen Variablen dieses Terms müssen mit Hilfe von Turbulenzmodellen, wie beispielsweise dem RNG-Modell, gelöst werden. Das RNG-Turbulenzmodell ist ein Zweigleichungsmodell, bei dem die beiden zusätzlichen Variablen (turbulente kinetische Energie k und isotrope Dissipationsrate ϵ) explizit ermittelt werden. Bei nahezu stationärem Zustand einer Simulation basierend auf den RANS-Gleichungen verändern sich aufgrund der zeitlichen Mittelung die hydraulischen Parameter, wie z. B. die Geschwindigkeit oder die Schubspannung kaum mit der Zeit. Das RNG-Turbulenzmodell wird von Flow-3-D (Version 12.0) für Sedimenttransportsimulationen empfohlen.

Beim LES-Turbulenzmodell werden die größeren turbulenten Strukturen dagegen direkt mittels Berechnungsnetz gelöst. Die Eigenschaften der kleineren turbulenten Strukturen werden abgeschätzt bzw. in sehr kleinen Skalen vernachlässigt. Das LES-Turbulenzmodell benötigt daher ein möglichst feines Rechenetz, um damit auch die Eigenschaften kleinerer turbulenten Strukturen entsprechend nachzubilden. Dieses Turbulenzmodell ist von Natur aus dreidimensional, wobei die Ergebnisse auch für stationäre Zustände zeitlich veränderlich sind. Das LES-Modell liefert daher meist naturnähere Ergebnisse als auf RANS-Gleichungen basierenden Turbulenzmodelle.

2.3 Randnahe Modellierung

In der Natur bildet sich bei Fluidströmungen in der Nähe von Festkörpern eine Grenzschicht aus, welche die in unmittelbarer Wandnähe vorliegenden, nahezu ruhenden Fluidpartikel von der durch Turbulenz geprägten Strömung trennt. Diese Grenzschicht kann weiter in die laminare viskose Unterschicht und den Übergangsbereich aufgeteilt werden. Im Übergangsbereich haben viskose und turbulente Effekte einen gleichwertigen Einfluss auf die Strömung [6], wobei die Schubspannung als konstant und gleichwertig zur Wandschubspannung angenommen wird.

In einer numerischen Simulation mit Flow-3-D werden die Geschwindigkeiten in den an einen Festkörper angrenzenden Randzellen mit einem logarithmischen Profil berechnet. Die orthogonale Abmessung der ersten Rechenzelle zum Festkörper sollte dementsprechend die Höhe des Übergangsbereiches nicht unter- oder überschreiten. Ein Wert zur Bestimmung einer geeigneten orthogonalen Abmessung der ersten Rechenzelle ist die dimensionslose Wanddistanz y^+ :

$$y^+ = \frac{u_T y \rho_f}{u_f} \quad (1)$$

mit

$$u_T = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_f}} \quad (2)$$

Dabei ist u_T die Schubspannungsgeschwindigkeit, ρ_f die Dichte des Fluids, y die Dicke der ersten Zelle und μ_f die kinematische Viskosität des Fluids. Die dimensionslose Wanddistanz y^+ soll nach Angaben von Flow-3-D einen Wert zwischen minimal 30 und maximal 100 bis 500 einnehmen [2]. Im nachfolgend dargestellten Forschungsvorhaben wurde das optimale Rechennetz anhand einer Sensitivitätsanalyse ermittelt. Anschließend wurde für das gewählte Rechennetz der y^+ -Parameter bestimmt, um diesen zukünftig als Anhaltspunkt für ähnliche numerische Sedimenttransportmodelle zu nutzen.

2.4 Randbedingungen des HN-Modells

Die Randbedingungen, die für das numerische Modell Anwendung fanden, wurden aus den Vorgaben des physikalischen Modells abgeleitet. Der Durchfluss durch das physikalische Modell konnte mit Hilfe von zwei scharfkantigen Überfallwehren am Ende der beiden Kanäle kontrolliert werden. Die zugehörigen Wehrhöhen wurden für einen Abzweigwinkel von 30° derart eingestellt, dass sich der Abfluss gleichmäßig auf die beiden Gerinnearme aufteilt. Der Modellzufluss wurde über ein senkrechtes Rohr von oben in ein vorgelagertes Beruhigungsbecken geführt und von dort über ein scharfkantiges Wehr in das Gerinne eingeleitet. Am Gerinneeinlauf wurden im Anschluss an das Wehr drei Filter und eine Tauchwand eingebaut, die zur Strömungsberuhigung dienten. Die Ergebnisse der

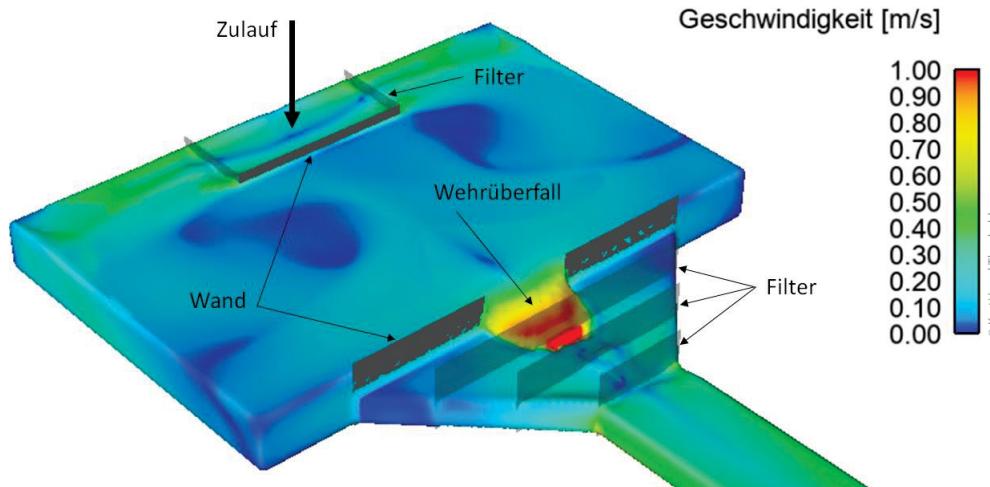


Bild 3: Aufbau und Geschwindigkeitsverteilung im Zulaufbereich des numerischen Modells

physikalischen Untersuchungen für die Gerinneabzweigung von 30° wurden von Bulle als sohennahe und oberflächennahe Geschwindigkeitsverteilungen sowie als Wasserspiegellagen und Geschiebeverteilungen in den beiden Gerinnearmen im Bereich der Verzweigung dargestellt und dienten der Ermittlung der Randbedingungen im numerischen Modell als Grundlage.

Im Zuge der ersten numerischen Untersuchungen des Verzweigungsgerinnes wurde vereinfachend angenommen, dass sich die Strömung innerhalb des Gerinnes bereits kurz nach dem Wehrüberfall im Zulaufbereich des physikalischen Modells beruhigt hat und sich bis zur Gerinneverzweigung näherungsweise uniform verhält. Daher wurde der Zulauf- und Beruhigungsbereich des physikalischen Modells in den numerischen Modellen zunächst nicht mit abgebildet. Als Einlaufrandbedingung wurde für die numerischen Modelle stattdessen ein Druckrand definiert. Als untere Randbedingung wurde für die beiden Gerinnearme jeweils ein Durchfluss von $Q = 2,5 \text{ l/s}$ vorgegeben. Auf diese Weise konnten für das Gerinne mit einer 30° -Verzweigung sowohl für die Geschwindigkeitsverteilung als auch für den Geschiebetransport Ergebnisse ähnlich denen der physikalischen Untersuchungen erzeugt werden. Mit zunehmendem Winkel der Gerinneverzweigung traten jedoch auch zunehmend größere Abweichungen zwischen den Ergebnissen der numerischen und physikalischen Untersuchungen auf. So hatten die numerischen Untersuchungen bei einem Verzweigungswinkel von 90° vor der Abzweigung beispielsweise deutlich niedrigere Geschwindigkeiten als die physikalischen Untersuchungen zur Folge. Dadurch wurde im numerischen Modell im Gegensatz zum physikalischen Modell ein höherer Anteil des Geschiebes vor der Verzweigung abgelagert. Entsprechend gelangte nur eine geringere Geschiebemenge in die beiden Gerinnearme stromab der Verzweigung.

Im nächsten Schritt der Untersuchungen wurde deshalb der Zulauf- und Beruhigungsbereich des physikalischen Modells numerisch möglichst genau nachgebildet. Zu diesem Zweck wurden die Tauchwand im Einlaufbecken sowie das überströmte Wehr und die Filter im Übergang zum eigentlichen Gerinne in das numerische Modell übernommen. Als Einlaufrandbedingung für das numerische Modell wurde statt eines Druckrandes eine Durchflussquelle vorgegeben (**Bild 3**). Auf diese Weise konnte für alle untersuchten Verzweigungswinkel eine bessere Übereinstimmung zwischen den numerischen und physikalischen Ergebnissen erreicht werden. Diese Beobachtung lässt vermuten, dass ein Einfluss des verwendeten Wehres und der Filter im Modellzulauf auf die Ergebnisse der physikalischen Versu-

che vorlag und zumindest im ersten Bereich des Gerinnes eine nicht vollkommen beruhigte und uniforme Strömung auftrat.

Für die weiteren Untersuchungen wurde das um den Zulaufbereich erweiterte numerische Modell verwendet. Da die Aufzeichnungen von Bulle keine detaillierten Informationen zu Parametern, wie der Wehrhöhe oder der Durchlässigkeit der verwendeten Filter im Zulaufbereich, enthalten, diese jedoch erwartungsgemäß einen Einfluss auf die vorliegende Strömungssituation haben, wurden die unbekannten Parameter für die weiteren Untersuchungen mit Hilfe der nachfolgend beschriebenen Sensitivitätsanalyse abgeschätzt.

2.5 Sensitivitätsanalyse

Um ein für die Untersuchung von Geschiebetransportprozessen optimiertes numerische Modell zu erstellen, ist es wichtig, ein geeignetes Rechennetz zu bestimmen, mit welchem die physikalischen Prozesse im Modell möglichst naturnah nachgebildet werden. Zu diesen Zweck wurde eine Sensitivitätsanalyse anhand des Modells mit einem 30° -Abzweigwinkel durchgeführt. Für die Modelle mit 60° - und 90° -Abzweigwinkel wurden die ermittelten Werte übernommen und validiert.

Im Zuge der Sensitivitätsanalyse wurden für das Modell des Verzweigungsgerinnes Berechnungsnetze mit variierenden Netzelementgrößen untersucht. Eine Netzverfeinerung führte dabei zu größeren Berechnungszeiten, während eine größere Vermischung weniger genaue Berechnungsergebnisse zur Folge hatte. Um für die Untersuchung der Geschiebetransportprozesse unter diesen Vorgaben eine geeignete Größe der Netzelemente zu ermitteln, wurden unterschiedliche Fließparameter ausgewertet und miteinander verglichen. Eine der maßgebenden Größen hinsichtlich des Geschiebetransportes ist die Sohleinschubspannung. Die Änderung dieser Größe in Abhängigkeit der gewählten Netzelementgröße ist in **Bild 4** dargestellt. Es wird deutlich, dass die maximale Sohleinschubspannung für Netzelemente kleiner als $0,014 \text{ m}$ einen nahezu konstanten Wert einnimmt. Die dargestellten Schubspannungen wurden für jeden Versuch an einem definierten Ort im Bereich der Gerinneverzweigung ermittelt (**Bild 5**). Die Werte der dimensionslosen Wanddistanz y^+ wurden anschließend mit den ermittelten maximalen Schubspannungen berechnet.

In **Bild 5** ist die Sohleinschubspannungsverteilung für das Modell mit 30° -Abzweigwinkel ersichtlich. Die linke Teilabbildung zeigt die zeitlich nahezu konstanten Ergebnisse für das RNG-Turbulenzmodell. In der rechten Teilabbildung sind die zeitlich leicht variierenden Sohleinschubspannungen für das

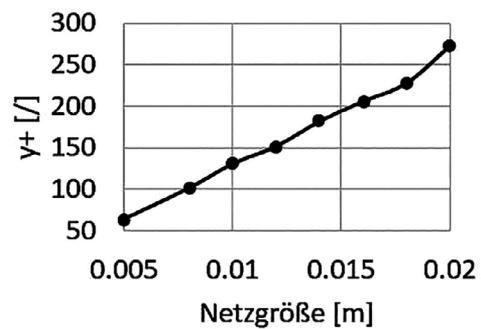
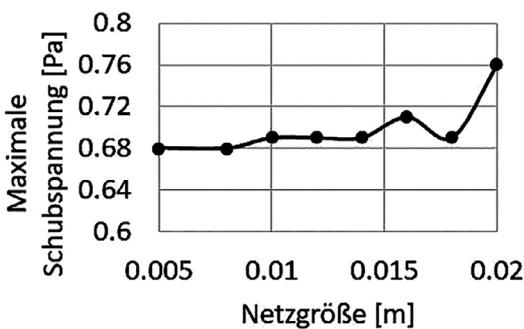


Bild 4: Veränderung der Schubspannung (links) und des y^+ -Parameters (rechts) in Abhängigkeit der Rechennetzdiskretisierung

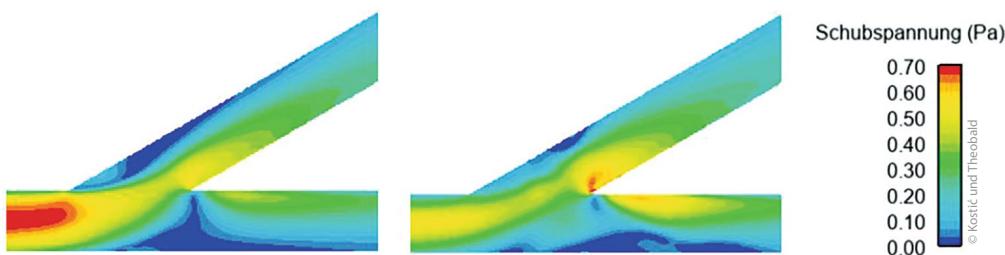


Bild 5:
Sohlenschubspannungsverteilung für das RNG-Modell (links) und das LES-Modell (rechts) im Verzweigungsbereich des numerischen Modells mit 30°-Abzweigwinkel
© Kostic und Theobald

LES-Turbulenzmodell dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Werte insgesamt eine ähnliche Größenordnung aufweisen. Das RNG-Turbulenzmodell zeigt im Bereich vor der Gerinneverzweigung etwas größere Schubspannungen, wohingegen das LES-Turbulenzmodell höhere Schubspannungen auf der rechten Seite des abzweigenden Armes sowie auf der linken Seite des geraden Armes zur Folge hat.

Für die weiteren numerischen Versuche wurde auf Basis der Sensitivitätsanalyse eine allgemeine Netzelementgröße von 0,01 m ausgewählt. Im für den Geschiebetransport besonders relevanten Sohlenbereich des Gerinnes wurden die ersten drei Netzebenen mit einer Auflösung von 0,005 m zusätzlich feiner diskretisiert. Zwischen dem feiner diskretisierten Randbereich und dem größer diskretisierten Hauptgerinne wurde ein allmäßlicher Übergang vorgegeben. Für das Netz mit einer Diskretisierung von 0,005 m im Bereich der Sohle wurde ein maximaler Wert von ca. 60 für die dimensionslose Wanddistanz y^+ ermittelt, womit die Vorgaben von Flow-3-D eingehalten werden. Bei der gewählten Diskretisierung besteht das Rechennetz aus ca. 3 300 000 Elementen.

Neben der Bestimmung der Netzgröße wurden für weitere Parameter Sensitivitätsanalysen durchgeführt. So wurden beispielsweise die sohlnahe Geschwindigkeitsverteilung sowie verschiedene Wasserstände aus den numerischen Untersuchungen mit den Ergebnissen des physikalischen Versuchs für verschiedene Höhen der Überfallwehre am Anfang und Ende des Modells verglichen. Auch die Durchlässigkeit der Filter, die sich am Gerinneanfang befinden, sowie die Rauheit der Sohle wurden auf eine ähnliche Weise bestimmt.

Die Sensitivitätsanalysen wurden auf Basis des RNG-Turbulenzmodells durchgeführt, da die Ergebnisse mit diesem Modell im stationären Zustand einen zeitlich konstanten Wert aufweisen und dadurch eine bessere Vergleichbarkeit bieten. Simulationsergebnisse basierend auf dem LES-Turbulenzmodell sind mit einem entsprechend feinen Netz dagegen zeitlich stark veränderlich und dadurch nicht ohne weiteres für eine Sensitivitätsanalyse geeignet.

Die späteren Sedimenttransportsimulationen wurden für einen umfangreichen Ergebnisvergleich dennoch mit dem RNG- sowie dem LES-Turbulenzmodell durchgeführt.

3 Ergebnisse der numerischen Untersuchungen

Um die numerischen Ergebnisse für das gewählte Rechennetz und die verwendeten Randbedingungen mit den Ergebnissen des physikalischen Modells vergleichen zu können, wurden die ursprünglich von Bulle in Form von Isolinien dargestellten

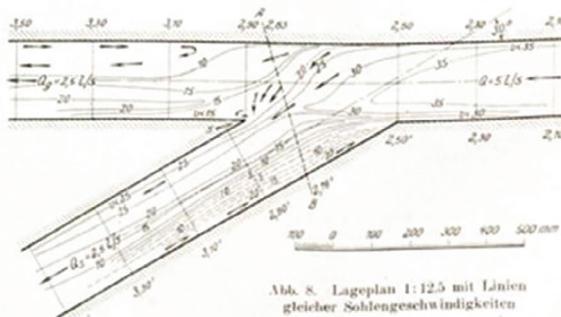


Abb. 8. Lageplan 1:12,5 mit Linien gleicher Sohlengeschwindigkeiten

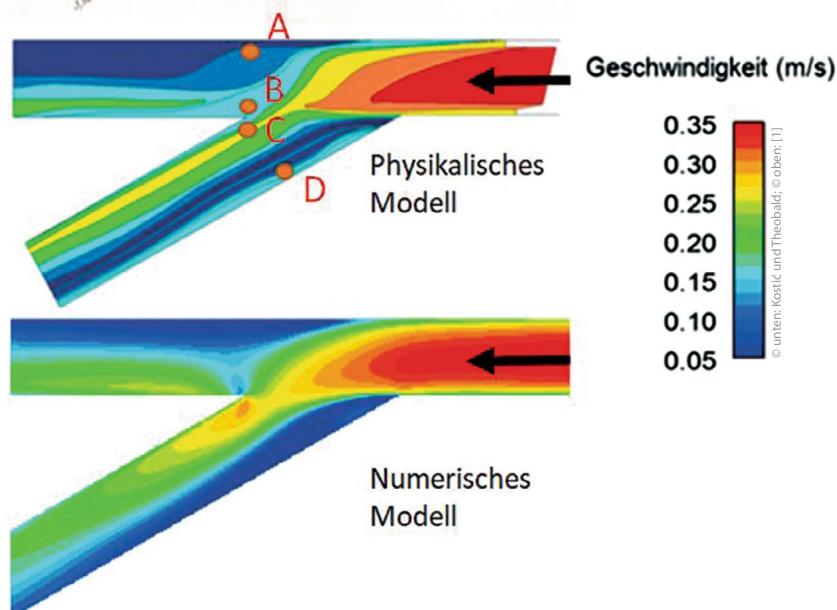


Bild 6: Sohlengeschwindigkeitsverteilung des physikalischen Modells in originaler Darstellung (oben) sowie mit eingefügter Farbskala (Mitte) im Vergleich mit der Sohlengeschwindigkeitsverteilung des numerischen Modells (unten) in einer Höhe von jeweils 1 cm über der Sohle
© unten: Kostic und Theobald; © oben: [1]

Tabelle 1: Wassertiefen in den Punkten A, B, C und D (Bild 6) für die numerischen und physikalischen Untersuchungen (Quelle: Kostić und Theobald)

Untersuchtes Modell	Wassertiefe [cm] im Punkt:				
	A	B	C	D	
30°	Physikalisch	7,6	7,9	7,4	7,0
	Numerisch	7,5	7,7	7,3	7,2
60°	Physikalisch	7,5	7,7	7,4	6,8
	Numerisch	7,5	7,6	7,4	6,7
90°	Physikalisch	7,4	7,7	7,4	6,7
	Numerisch	7,6	7,8	7,5	6,7

Geschwindigkeiten über eine Farbskala visualisiert (**Bild 6**). Besonders relevant für den Geschiebetransport sind die sohlennahen Geschwindigkeiten. Diese wurden für das physikalische und das optimierte numerische Modell in **Bild 6** in einer Ebene einen Zentimeter über der Sohle gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt, dass die Geschwindigkeiten vor der Verzweigung für das numerische und das physikalische Modell die gleiche Größenordnung aufweisen. Zusätzlich wird bereits deutlich, wie sich die höheren sohlennahen Geschwindigkeiten in beiden Modellen in den Seitenarm der Verzweigung ausrichten. In beiden Modellen sind Bereiche mit geringeren Geschwindigkeiten auf der linken Seite des abzweigenden Armes sowie auf der rechten Seite des geraden Armes zu erkennen. Auf der rechten Seite des Abzweigarmes liegen die Geschwindigkeiten für beide Modelle mit ca. 0,2 m/s in einem ähnlichen Bereich, wobei beim physikalischen Modell ein schmaler Streifen mit höheren Geschwindigkeiten von ca. 0,25 m/s direkt neben der Wand ersichtlich ist. Im numerischen Modell treten lokal höhere Geschwindigkeiten im Seitenarm direkt nach der Verzweigung auf, die sich mit zunehmender Entfernung von der Gerinneverzweigung allmählich verringern und an die Geschwindigkeiten im physikalischen Modell annähern.

An den in **Bild 6** gekennzeichneten Punkten A, B, C und D wurden die Wassertiefen der numerischen und physikalischen Modelle mit 30°-, 60°- und 90°-Abzweigwinkel ausgewertet. Der Vergleich der Wassertiefen in **Tabelle 1** zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den numerischen und physikalischen Ergebnissen. Zusätzlich wird deutlich, dass es mit einem größeren Abzweigwinkel zu einer größeren Wasserspiegelquerneigung im Seitenarm kommt.

In **Bild 7** sind die Geschwindigkeitsverteilungen einschließlich der zugehörigen horizontalen Geschwindigkeitsvektoren

(ausgedünnt) für die numerischen Untersuchungen an den Verzweigungsgerinnen mit 30°-, 60°- und 90°-Abzweigung direkt an der Wasserspiegeloberfläche (links) sowie 5 Millimeter über der Sohle (rechts) gegenübergestellt. Es wird ersichtlich, wie die Geschwindigkeitsvektoren an der Sohle sich vorwiegend in den Seitenarm ausrichten, wohingegen die Geschwindigkeitsvektoren an der Oberfläche auch in den geraden Arm zeigen. Diese Beobachtung ist für die späteren Sedimenttransportuntersuchungen von besonderer Bedeutung, da sich die untersuchten Sedimente vorwiegend als Geschiebe an der Sohle bewegen und dort der Strömung folgen.

Es zeigt sich, dass es mit einem zunehmenden Abzweigwinkel zu immer größeren Geschwindigkeiten an der rechten Seite des Abzweigarmes und einer größeren Rückströmungszone an der linken Seite des Abzweigarmes kommt. Die oberflächennahen Geschwindigkeiten nehmen mit steigendem Verzweigungswinkel dagegen eher in Richtung des geraden Arms zu.

Ergänzend zu **Bild 7** sind in **Bild 8** Querschnitte der Geschwindigkeitsverteilung im Bereich der Gerinneverzweigung gegenübergestellt. Die Querschnitte A und B sind in **Bild 7** dargestellt und liegen auf 1/3 bzw. 2/3 der Öffnungsbreite des Verzweigungsarms.

Aus **Bild 8** ist zu erkennen, dass sich mit einem zunehmenden Abzweigwinkel auch die lateralen Geschwindigkeiten erhöhen (vgl. größere Geschwindigkeitsvektoren).

4 Fazit

Ziel des Forschungsvorhabens war es, verschiedene physikalischen Untersuchungen von Dr.-Ing. Hermann Bulle, die sich

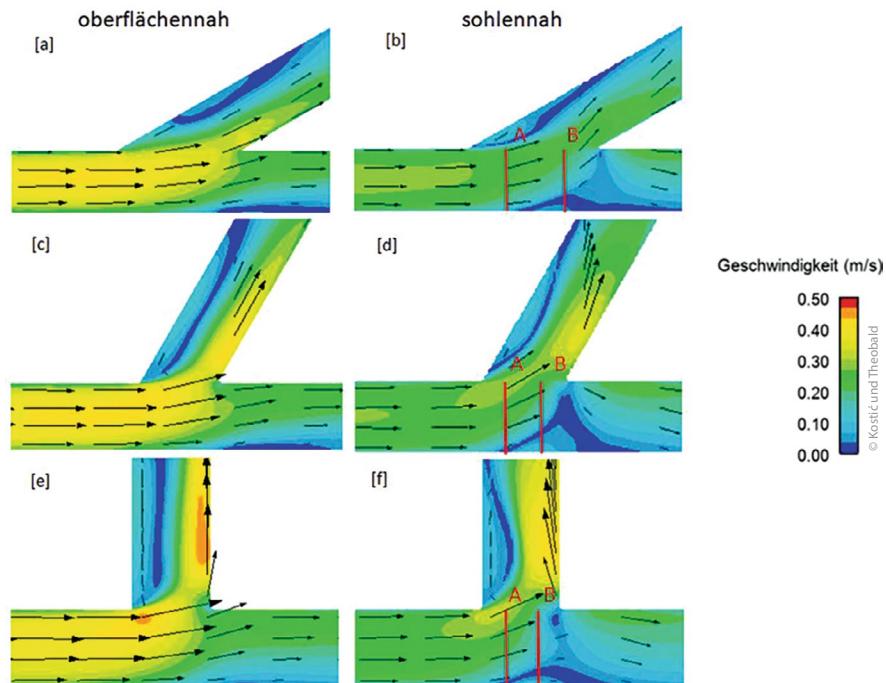


Bild 7: Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung und der horizontalen Geschwindigkeitsvektoren (ausgedünnt) an der Oberfläche (links) und 0,5 cm über der Sohle (rechts) der numerischen Modelle mit 30°- (a und b), 60°- (c und d) und 90°-Abzweigwinkel (e und f)

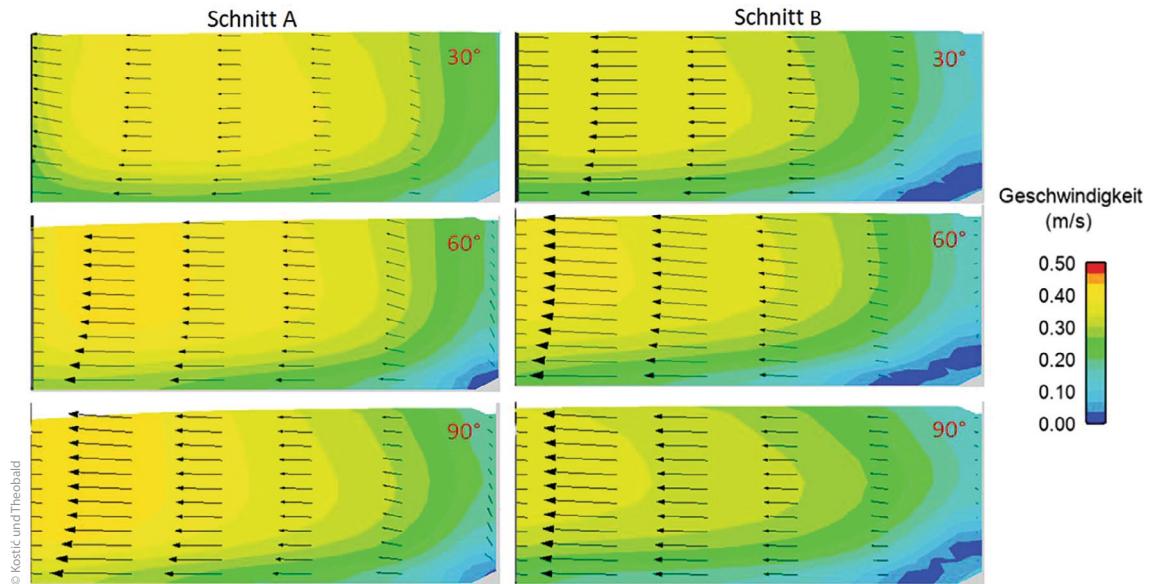


Bild 8: Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung und der lateralen Geschwindigkeitsvektoren (ausgedünnt) im Schnitt A (links) und B (rechts) des numerischen Modells mit 30°-, 60°- und 90°-Abzweigungswinkel

mit den hydraulischen und morphologischen Verhältnissen an Gerinneverzweigungen beschäftigen, mithilfe numerischer 3-D-HN-Methoden nachzubilden.

Im Zuge der numerischen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass alle Komponenten aus dem Einlaufbereich des physikalischen Modells möglichst detailgetreu im numerischen Modell nachgebildet werden müssen, um eine gute Ergebnisübereinstimmung zu erreichen. Der gesamte Einlaufbereich des physikalischen Modells wurden daher in das numerische Modell übernommen.

Verschiedene Modelleigenschaften, wie die Höhe der Überfallwehre im Zulauf- und Auslaufbereich des Modelles, die Rauheit der Modellsohle sowie die Durchlässigkeit der verwendeten Filter zur Strömungsberuhigung, wurden in den Untersuchungen von Bulle nicht genauer beschrieben. Um diese Eingangsparameter sowie eine geeignete Diskretisierung für die numerischen Untersuchungen zu bestimmen, wurde anhand der Fließgeschwindigkeiten, Wassertiefen und Sohlenschubspannungen im Modell eine ausführliche Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

Die hydraulischen Untersuchungen mit dem resultierenden numerischen Modell zeigen, dass die Strömungsparameter für das numerische und das physikalische Modell qualitativ und quantitativ vergleichbar sind. Es wird ersichtlich, dass sich im numerischen Modell analog zum physikalischen Modell die für

den Geschiebetransport besonders relevanten sohlennahen Geschwindigkeiten hauptsächlich in den Seitenarm der Verzweigung ausrichten. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse mit steigendem Verzweigungswinkel im abzweigenden Arm eine Zunahme der sohlennahen Geschwindigkeiten an der rechten Gerinneseite sowie eine größer werdende Rückströmzone an der linken Gerinneseite.

In einer zweiten Publikation [3] werden die Ergebnisse umfangreicher Simulationsreihen zum Geschiebetransport für das Verzweigungsgerinne und die unterschiedlichen Abzweigungswinkel zwischen 30° und 90° vorgestellt und diskutiert.

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] Flow Science Inc. (Hrsg.): FLOW-3D v12.0 User Manual. 2019.
- [3] Kostić, T.; Theobald, S.: Simulation des Geschiebetransports in Verzweigungsgerinnen mit 3-D-morphodynamischen Modellen. In: WasserWirtschaft 111 (2021), Heft 12, S. 39-46.
- [4] Träbing, K.; Dickel, S.; Theobald, S.: Bauwerkshydraulik und Standortoptimierung für Kleinwasserkraftwerke in China. In: WasserWirtschaft 109 (2019), Heft 6, S. 36-42.
- [5] Versteeg, H. K.; Malasekera, W.: An introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method. Essex: Longman Scientific & Technical, 1995.
- [6] Schlichting, H.; Gersten, K.: Grenzschicht-Theorie. 10. A. Heidelberg: Springer, 2005.
- [7] 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 analysis of hydraulic flow in bifurcations

Bifurcations are marked by complex hydraulic conditions, characterized by high secondary flow, which is of great interest for sediment transport. This research shows 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 flow characteristics in the bifurcation, whereas a following article describes the simulation of sediment transport in the bifurcation.