Einsatz morphodynamisch-numerischer Methoden am Beispiel eines Niederrheinmäanders

Autoren: Dipl.-Ing. Lars Backhaus, Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe
Dipl.-Ing. Jochen Riesterer, Karlsruher Institut für Technologie

Die Geschiebebewirtschaftung und die Orientierung von Unterhaltungsmaßnahmen an Bewirtschaftungszielen gewinnen an Binnenschifffahrtsstraßen zunehmend an Bedeutung. Hierbei sind sowohl Planung und Bewertung als auch Optimierung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen auf Prognosen der morphologischen Prozesse angewiesen. Angesichts deren Komplexität ist man dabei auf den Einsatz gegenständlicher Modelle und zunehmend auch mehrdimensionaler numerischer Feststofftransportmodelle angewiesen. Gekrümmte Gerinneabschnitte stellen in diesem Zusammenhang eine besonders anspruchsvolle Herausforderung für die Feststofftransportmodellierung dar. Die dort vorhandene Dynamik führt zur ständigen Umgestaltung der Ufer- und Sohlbereiche und verändert somit die Strömungscharakteristik, was wiederum Auswirkungen auf die Binnenschifffahrt oder die Hochwassersituation haben kann.

1 UNTERSUCHUNGSGEBIET

Der Rheinabschnitt bei Düsseldorf (Rh-km 739,0 bis 749,0, siehe Bild 1) ist durch starke Mäander und eine große lokale Sohldynamik geprägt. Er stellt somit ein gutes Beispiel für die Komplexität der hydraulischen und morphologischen Prozesse in Gerinnekrümmungen dar. Zur Vermeidung der Beeinflussung der Binnenschifffahrt werden daher in diesem Rheinabschnitt bereits über eine geraume Zeit gezielte Baggerungen bzw. Verklappungen durchgeführt *(Messing, 2008)*. Vor diesem Hintergrund wurde an der BAW im Rahmen des Projekts “Geschiebezugabe mittlerer Niederrhein” ein zweidimensionales numerisches Modell aufgebaut mit dem Ziel, die Effizienz zukünftiger flussbaulicher Maßnahmen zu erhöhen sowie die Unterhaltungsmaßnahmen möglichst ökonomisch zu gestalten.

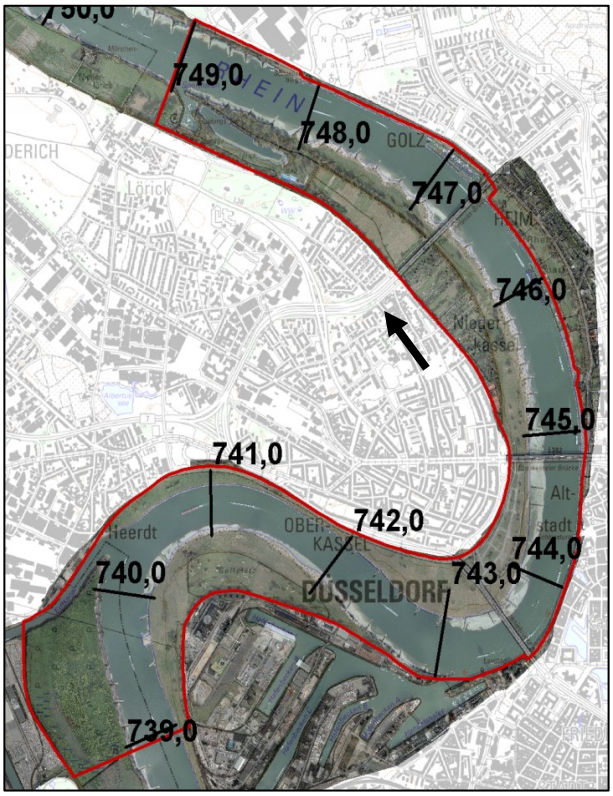

Bild 1: Überblick über das Modellgebiet

Aufgrund der starken Gerinnekrümmungen werden die hydraulischen und morphologischen Prozesse durch auftretende Sekundärströmungen signifikant beeinflusst *(siehe Blanckaert, 2009)*. Trotz ihrer im Vergleich zur Hauptströmung meist geringen Intensität beeinflusst die Sekundärströmung die sohlnahe Strömungsrichtung und somit

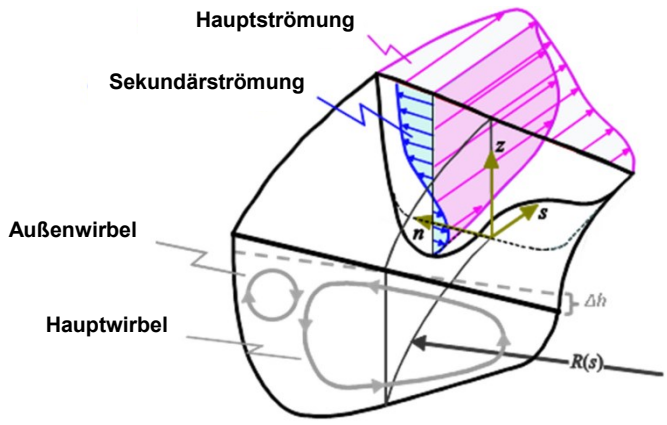

Bild 2: Strömungsanteile in Gerinnekrümmungen (nach Blanckaert and de Vriend, 2003)

die Richtung des Geschiebetransports *(Engelund, 1974)*. Dies führt zu einem Transport von Geschiebematerial quer zur Hauptströmung und verstärkt somit die lokalen Erosions- und Anlandungserscheinungen (siehe Bild 2). Um diese dreidimensionalen Effekte direkt erfassen zu können, wurde ergänzend ein 3D-Modell erstellt, dessen Ergebnisse im Rahmen der Untersuchungen den Ergebnissen des 2D-Modells sowie den vorhandenen Naturmessdaten gegenübergestellt wurden.

2 NUMERISCHE METHODEN

Zur numerischen Modellierung wurde das Programmpaket TELEMAC-SISYPHE der EDF (Electricité de France) eingesetzt. Dieses wird an der BAW bereits seit vielen Jahren mitentwickelt und im Rahmen verkehrswasserbaulicher Untersuchungen genutzt. Das hydrodynamisch-numerische (HN-) Verfahren TELEMAC bietet sowohl die Möglichkeit der 2D-tiefengemittelten als auch der dreidimensionalen Strömungsmodellierung (siehe *Hervouet, 2007*). Durch die Kopplung von TELEMAC mit dem Modul SISYPHE wird die Anwendung des Programmsystems auf die Betrachtung morphodynamischer Fragestellungen erweitert. SISYPHE ist ein prozessbasiertes Modell, bei dem der Sedimenttransport aufgeteilt in Geschiebe- und Schwebstoffanteil bestimmt wird. Neben der Verwendung unterschiedlicher Transportformeln (z.B. *Meyer-Peter und Müller, 1948*) ermöglicht SISYPHE die Erfassung verschiedener den Sedimenttransport beeinflussender Faktoren, wie z.B. der Sohlneigung oder der so genannten „Hiding- und Exposure-Effekte“. Zur Berücksichtigung des Einflusses der Sekundärströmungseffekte auf den Geschiebetransport im 2D-tiefengemittelten Modell wird die Winkelabweichung δ über den Ansatz nach *Engelund (1974)* berechnet. Hierbei wird die Abweichung der Sohlschubspannung τ von der tiefengemittelten Hauptströmungsrichtung in Abhängigkeit des Radius R sowie der Wassertiefe h berechnet (siehe Gl. 1 und 2). Der dabei verwendete Krümmungs-radius wird im numerischen Modell mit Hilfe der Neigung der freien Oberfläche rückgerechnet.

Transportformel:	Meyer-Peter und Müller (MPM-Faktor = 8)
Korngrößenverteilung:	10 Fraktionen (d_{min} = 0,4 mm, d_{max} = 59,5 mm, d_m = 18,8 mm)
krit. Shieldsparameter:	van Rijn Formel (θ_c = Funktion von d_i)
Hiding/Exposure Formel:	Karim et al.
Formel “slope effect”:	Soulsby / Talmon et al. (φ_s = 40°; β = 1,3)
Sekundärströmungs-korrektur (2D-Modell):	Engelund (Korrekturfaktor α’ = 0,7)
Definition “active layer”:	konstante “active layer” Höhe (h = 0,1 m)

Tabelle 1: Parameter morphodyn. Modell

$$\tan\delta = 7\frac{h}{R} \qquad (1)$$

$$\tau_{Sekundärströmung} = 7\frac{h}{R}\tau_{Hauptströmung} \qquad (2)$$

3 HYDRAULISCHE MODELLIERUNG

Die Analyse der hydraulischen Simulationsergebnisse zeigte, dass sich im 2D- und 3D-Modell eine nahezu identische Wasserspiegelquerneigung einstellt (ca. 0,5‰ bei Rh-km 740,7, siehe Bild 3). Die Abweichungen zwischen Simulation und Naturmessung bewegten sich im Bereich der Messgenauigkeit (±2 cm), sodass die Voraussetzungen für eine korrekte Anwendung des Sekundärströmungsansatzes im 2D-Modell bestätigt werden konnten.

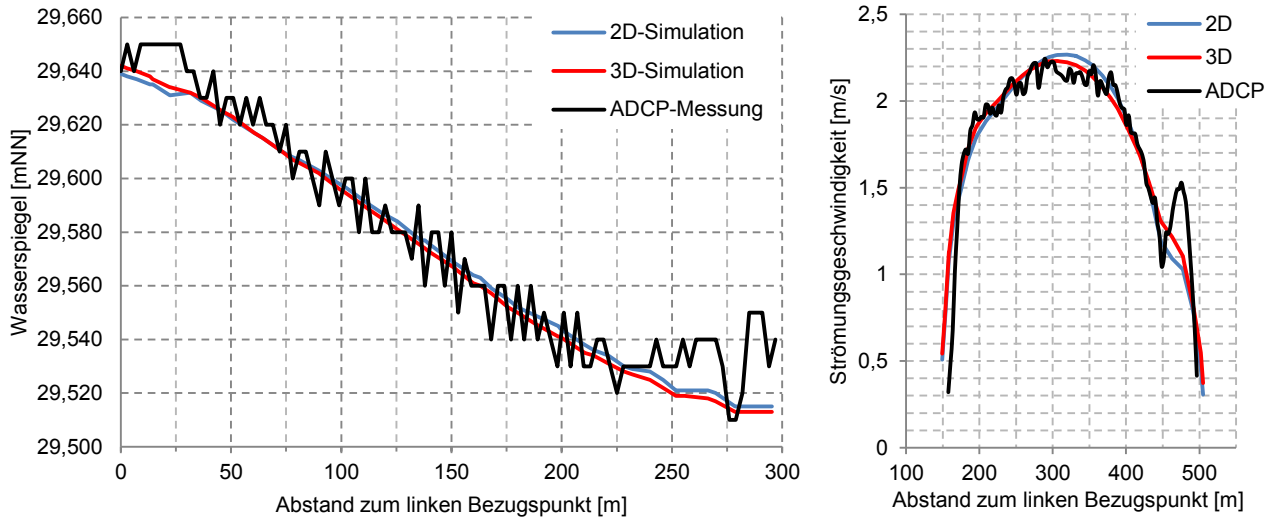

Bild 3: Wasserspiegelquerneigung / Fließgeschwindigkeit bei Rh-km 740,7 (Q=3080 m³/s)

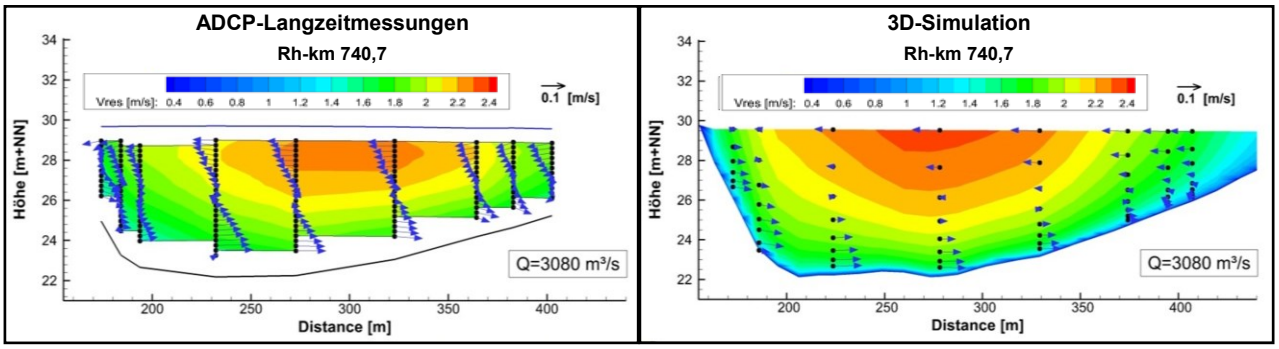

Bild 4: Hauptströmungsgeschwindigkeiten (flächig) und Sekundärströmungen (vektoriell) der ADCP-Langzeitmessung und des 3D-Modells bei Rh-km 740,7 (Q=3080 m³/s)

Hinsichtlich der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten konnten zwischen 2D- und 3D-Modell keine signifikanten Differenzen festgestellt werden. Gegenüber den ADCP-Messungen stimmt die Fließgeschwindigkeitsverteilung sowie die maximale Fließgeschwindigkeit gut überein (siehe Bild 3). Ein ähnliches Bild liefert die Analyse der im 3D-Modell auftretenden Sekundärströmung, welche in Bild 4 exemplarisch für das Querprofil bei Rh-km 740,7 dargestellt ist. Sowohl die Intensität als auch die Ausbildung der Sekundärströmung im 3D-Modell stimmen gut mit den Naturmessdaten überein. Nachdem im Rahmen der hydraulischen Kalibrierung mit beiden HN-Modellen plausible Ergebnisse erzielt wurden, konnte im nächsten Schritt die morphologische Kalibrierung der beiden Modelle erfolgen.

4 MORPHODYNAMISCHE MODELLIERUNG

Im Rahmen der morphologischen Kalibrierung standen zunächst integrale Modellgrößen wie die Transport-Abfluss-Beziehung, die Jahrestransportfracht oder die Erosions-/Akkumulationstendenzen im Fokus. Im Verlauf des Kalibrierungsprozesses wurde eine bestmögliche Annäherung an die Naturdaten der Sohltopografie (Peilungsdaten), der Kornverteilung der Sohle (Gefrierkernproben) und des transportierten Materials (Geschiebefänger) angestrebt. Zur Minimierung des Kalibrieraufwands wurde zunächst das 2D-Feststofftransportmodell kalibriert und der optimierte Parametersatz auf das 3D-Modell übertragen. Hierdurch konnte die Modellsensitivität einzelner Parameter relativ schnell analysiert werden (zeitl. Rechenaufwand: ~1/6 gegenüber 3D-Modell mit 10 Schichten). Erst im Anschluss erfolgte der Vergleich beider Modelle.
Für die morphologischen Betrachtungen wurden zunächst stationäre Berechnungen mit einem Abfluss von 4270 m³/s und einer Dauer von 100 Tagen durchgeführt. Anschließend wurde eine künstliche Ganglinie über 25 Tage erstellt, deren Abflussmaximum etwa dem eines MHQ von ca. 7000 m³/s entsprach. Hierdurch sollte die Beziehung zwischen Geschiebetransport- und Abflussmenge (Q_s-Q-Beziehung) analysiert werden. Zur Validierung der numerischen Berechnungen standen u.a. Naturdaten der Geschiebemessstelle Büderich (Rh-km 749,0) zur Verfügung, welche sich unterstrom der zweiten Krümmung befindet. Das modellierte Transportmaterial wurde anhand von Sohlproben in 10 Fraktionen unterteilt. Ausgangsverteilung für die morphodynamischen 2D- und 3D-Simulationen war die zeitlich gemittelte Kornverteilung, welche sich während einer 3-Jahres-Simulation mit natürlicher Ganglinie einstellte. Für die stationäre Berechnung zeigte sich bei den Sohländerungen eine tendenziell gute Übereinstimmung zwischen beiden Modellen (siehe Bild 5).

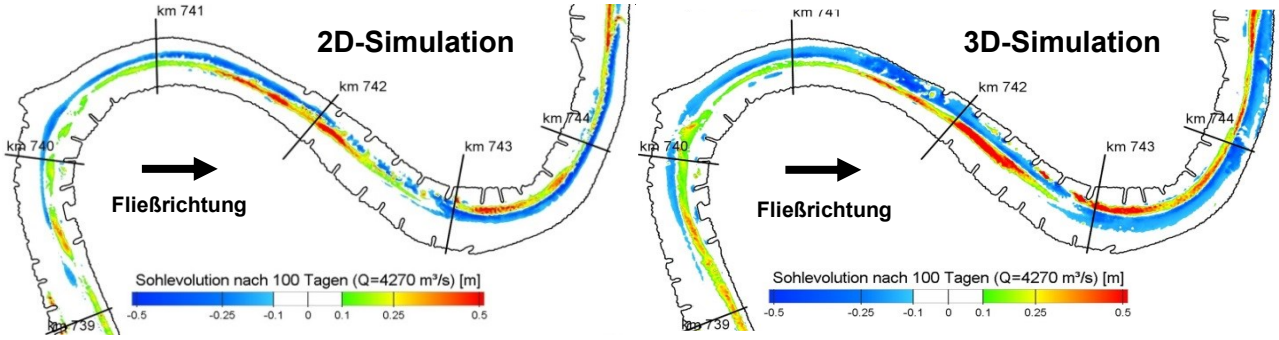

Bild 5: Sohländerungen der 2D- und 3D-Modellierung nach 100 Tagen bei Q_{stat}=4270 m³/s

Die in Gerinnekrümmungen typischen Erosions- und Anlandungsprozesse werden in beiden Modellen in vergleichbarer Größenordnung erfasst, wobei die Sohländerungen im 3D-Modell insgesamt etwas stärker ausfallen und die Furt sich im 3D-Modell richtigerweise etwas weiter unterstrom einstellt. Außer den Differenzen in den Anfangs- bzw. Endbereichen der Krümmungen, in denen sich die Sekundärströmung entwickelt bzw. zerfällt, konnten für den stationären Abflusszustand in beiden Modellen über weite Strecken vergleichbare Erosions- und Akkumulationsbereiche beobachtet werden.

Die Betrachtung der Q_s-Q-Beziehung, die auf einer instationären Abflussganglinie über 25 Tage basiert, zeigt für beide Modelle eine nahezu identische Beziehung zwischen Abfluss und Geschiebemenge (Bild 6). Für das an der Messstelle erfasste Abflussspektrum bis ca. 4000 m³/s stimmen die berechneten Geschiebetransportmengen zudem gut mit den Mittelwerten der Naturmessung überein, wobei die Messwerte eine relativ große Streuung aufweisen.

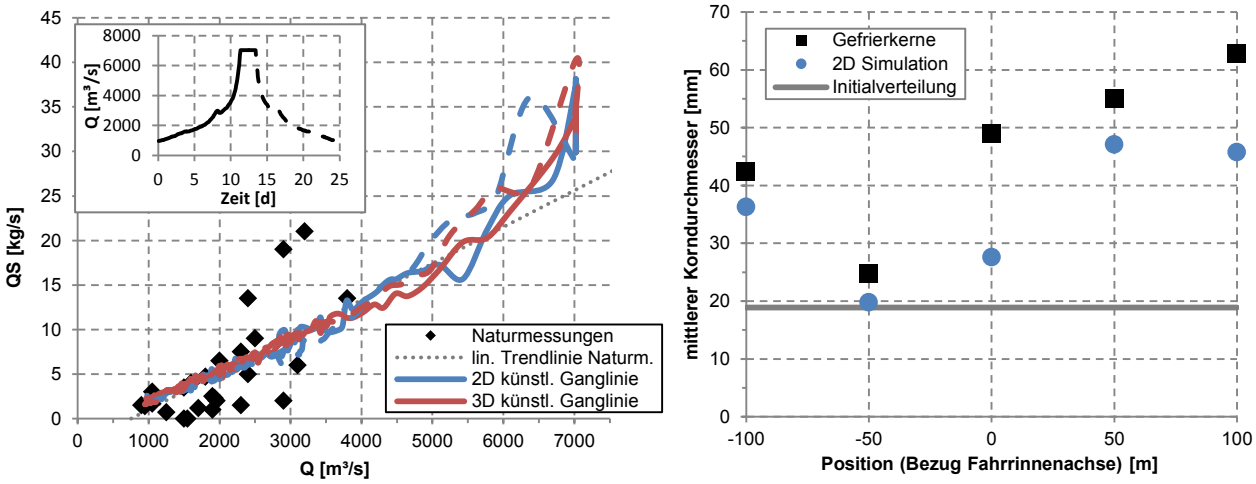

Bild 6: Auswertung der Q_s-Q-Beziehung (links) und Darstellung des mittleren Korndurchmessers nach 2-jähriger 2D-Simulation bei Rh-km 744,0 (rechts)

Neben der Simulation von stationären Abflussverhältnissen und einer künstlich erzeugten instationären Abflussganglinie wurde mit dem 2D-Modell zusätzlich die natürliche Abflussganglinie des Pegels Düsseldorf (Rh-km 744,2) über einen Zeitraum von 2 Jahren simuliert. Ausgangsverteilung hierfür war die Kornverteilung, welche sich ausgehend von einer einheitlichen Verteilung (d_m=18,89 mm) nach einer mehrjährigen Initialisierungssimulation einstellte. Anhand dieser Simulation konnte u.a. die Entwicklung des mittleren Korndurchmessers analysiert und mit Gefrierkernproben verglichen werden. Die Gefrierkerne wurden mithilfe des Taucherglockenschiffes „Carl Straat“ direkt aus dem Flussbett entnommen und in einem Labor gesiebt. Bild 6 (rechts; Blick in Fließrichtung) zeigt den mittleren Korndurchmesser an fünf Messstellen innerhalb des Querprofils Rh-km 744,0, das sich etwa im Scheitel der zweiten Flusskrümmung befindet. Deutlich zu erkennen ist der horizontale Sortierungseffekt, der durch die Sekundärströmung verursacht wird. Während sich am Innenufer (Gleithang) feines Material ablagert, kommt es im Bereich des Außenufers (Prallhang) zu einem Austrag der feinen Fraktionen. Ausgehend von dem konstanten Korndurchmesser zu Beginn der morphodynamischen Simulationen zeigen die 2D-Simulationsergebnisse eine ähnliche Entwicklung, wie sie auch in den Naturdaten festzustellen ist (siehe Bild 7 links).
Bild 7 (rechts) zeigt die kumulierten Transportfrachten der 2-Jahres-Simulation. Die dabei berechnete mittlere Jahresfracht von 187.000 t/a deckt sich mit den Angaben aus Naturmessungen zwischen 1990 und 2005 mit einer mittleren Frachtmenge von 180.000 t/a (*WSA Duisburg-Rhein, 2008*).

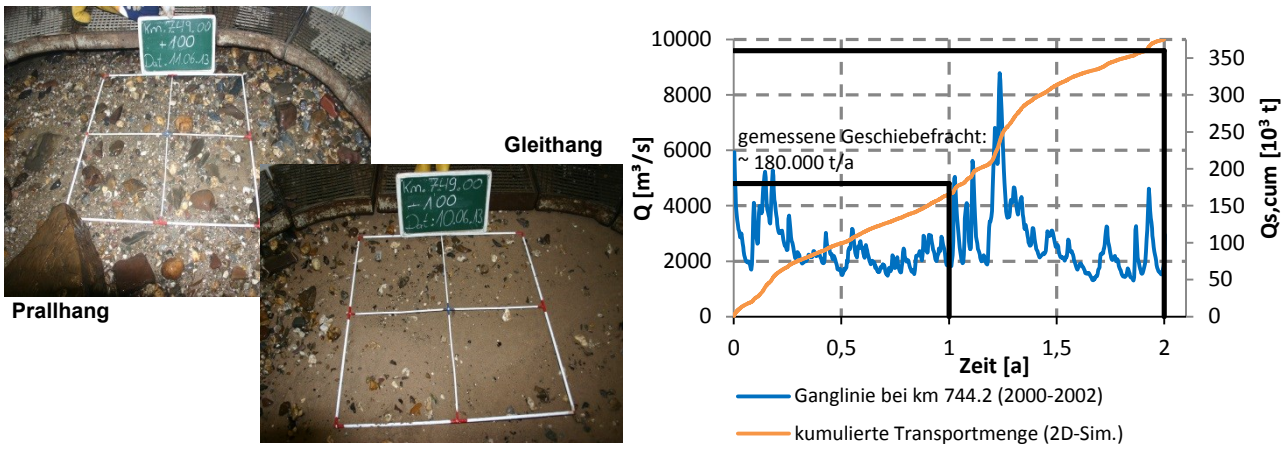

Bild 7: Sohlzusammensetzung bei Rh-km 749,0 (links) und kumulierte Transportmengen der 2D-Simulation über 2 Jahre

5 FAZIT/AUSBLICK

Der Vergleich zwischen 2D- und 3D-Modellierung zeigt eine überwiegend gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Größen in den hydraulischen und morphologischen Ergebnissen. Im Rahmen der numerischen Modellierung wurde die durch ADCP-Messungen erfasste Strömungssituation in beiden Modellen plausibel erfasst. Hinsichtlich der morphologischen Ergebnisse zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen 2D- und 3D-Modellierung. Der Ansatz zur Parametrisierung des Einflusses der Sekundärströmung auf den Geschiebetransport im 2D-tiefengemittelten Modell führt zu einer der 3D-Modellierung sehr ähnlichen Sohlentwicklung. So sind lediglich lokale Unterschiede in den Sohlhöhenänderungen sowie hinsichtlich der Lage der Furt im Krümmungsübergang zu verzeichnen.

Ziel der weiteren Projektarbeit ist es, die Erkenntnisse aus dem 10 km langen Modell auf ein 40 km langes 2D-Modell zu übertragen, das sich an den betrachteten Rheinabschnitt anschließt. Dabei werden zur verbesserten Bewertung der Prognosefähigkeit der Modelle die Simulationen des 10 km langen Abschnittes über einen längeren Zeitraum durchgeführt (2D: 10 Jahre, 3D: 2 Jahre). In diesem Zusammenhang müssen zudem zahlreiche anthropogene Eingriffe wie Kolkverbauten, Geschiebezugaben sowie Baggerungsmaßnahmen in der Modellierung berücksichtigt werden.

Literatur

Blanckaert, K. 2009. Saturation of curvature-induced secondary flow, energy losses, and turbulence in sharp open-channel bends: Laboratory experiments, analysis, and modelling, J. Geophyhs. Res., 114.

Blanckaert, K., de Vriend, H. J. 2003. Nonlinear modeling of mean flow redistribution in curved open channels. Water Resour. Res. 39(12), 1375.

Engelund, F. 1974. Flow and Bed Topography in Channel Bends. Jour. of the Hydr. Div. Vol. 100, No. HY11.

Hervouet, J.-M. 2007. Hydrodynamics of Free Surface Flows. John Wiley & Sons, West Sussex, England.

Messing, S. 2008. Geschiebezugabe Unterer Niederrhein. Binnenschifffahrt, Jg. 63, Nr.12.

Meyer-Peter, M., Müller, R. 1948. Formulas for bed-load transport. Sect. Int. IAHR Congress, Stockholm.

WSA Duisburg-Rhein. 2008. Statusbericht Niederrhein – Erfolgskontrolle des Geschiebemanagements am Rheinstrom, Heft 1.