

Praxisbeispiele für die Sedimentbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen

Christoph Heinzelmann, Thomas Brudy-Zippelius und Nils Peter Huber

Zusammenfassung

Bei Bau, Betrieb und Unterhaltung der Bundeswasserstraßen spielen morphologische Fragestellungen unter technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten oftmals eine wichtige Rolle. Als technisch-wissenschaftlicher Berater und Gutachter für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) hat die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ihre Methodenkompetenz für die Beantwortung morphologischer Fragen systematisch ausgebaut. Je nach Aufgabenstellung kommen heute vorwiegend ein- oder mehrdimensionale numerische Feststofftransportmodelle zum Einsatz. Gegenständliche Modelle werden sowohl für die Projektbearbeitung, als auch im Rahmen von Grundsatzuntersuchungen zum besseren Prozessverständnis sowie zur Validierung und Weiterentwicklung der numerischen Modelle eingesetzt. Flankiert werden die Modelluntersuchungen durch Naturuntersuchungen. Die Möglichkeiten, welche die sich ergänzenden wissenschaftlichen Methoden bieten, gepaart mit einem langjährigen wasserbaulichen Erfahrungswissen, gewährleisten, dass die BAW die morphologischen Fragestellungen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik bestmöglich beantworten kann. Im Beitrag werden der Methodeneinsatz der BAW anhand von Praxisbeispielen an Rhein, Elbe und Donau dargestellt und aktuelle Forschungsaktivitäten skizziert.

1 Veranlassung

Bei Bau, Betrieb und Unterhaltung der Bundeswasserstraßen spielen morphologische Fragestellungen unter technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten oftmals eine wichtige Rolle. Übergeordnetes Ziel ist es, die Gewässersohle großräumig in einem dynamischen Gleichgewicht zu halten oder sie in den gewünschten Gleichgewichtszustand zu bringen. Vielerorts kann dieser Zustand durch bauliche Maßnahmen im Fluss und im Vorland allein nicht erreicht werden. Flankierende Maßnahmen der Sedimentbewirtschaftung – künstliche Geschiebezugaben bzw. Unterhaltungsbaggerungen – sind erforderlich, um dauerhaft lokale oder großräumige Erosions- und Sedimentationserscheinungen zu vermindern und die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt zu gewährleisten. Die Optimierung der Sedimentbewirtschaftung im Zusammenwirken mit Stromregelungsmaßnahmen ist ein wesentlicher Arbeits- und Forschungsschwerpunkt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in ihrer Funktion als verkehrswasserbaulicher Dienstleister für die Dienststellen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes.

2 Methodeneinsatz in der BAW

Für numerische Modellierungen im Rahmen flussbaulicher morphologischer Fragestellungen setzt die BAW standardmäßig das Programmsystem TELEMAT (Hervouet, 2007) unter Verwendung einer zweidimensionalen tiefengemittelten Hydrodynamik und des indirekt gekoppelten morphodynamischen Moduls SISYPHE (Villaret et al., 2013) ein. Der modulare Aufbau des Programmsystems macht es auch möglich, das morphodynamische Modul mit einer dreidimensionalen Strömungssimulation zu koppeln. Anthropogene Maßnahmen zur Sedimentbewirtschaftung, wie Unterhaltungsbaggerungen oder Geschiebezugaben, werden

mit Hilfe des Moduls DredgeSim abgebildet, das in Kooperation mit der Universität der Bundeswehr in München entwickelt wurde (Maerker & Malcherek, 2010).

Der hohe numerische Aufwand, der für großräumige und langfristige zweidimensionale Simulationsmodelle erforderlich ist, kann nur durch Parallelisierung der Simulationsrechnung geleistet werden. Hierzu wird das Modellgebiet zerlegt, d. h. die Rechenlast auf viele Rechenkerne eines Großrechners (High Performance Computer) verteilt. Derzeit stehen der BAW zwei solche Rechner mit zusammen ca. 7.000 Rechenkernen zur Verfügung.

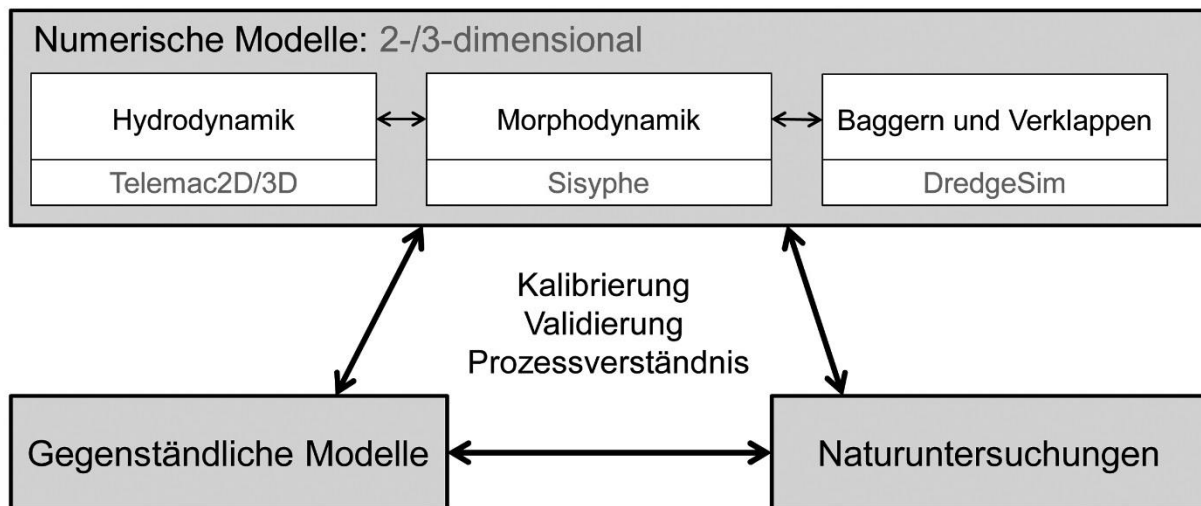


Abb. 1 Simulation morphodynamischer Prozesse an Bundeswasserstraßen (Brudy-Zippelius, Schmidt, 2014)

In den Fällen, dass Langzeitbetrachtungen über eine Dauer von vielen Jahrzehnten für Gewässerstrecken von mehr als 100 km anzustellen sind, sind mehrdimensionale Verfahren wegen des hohen Rechenaufwands nicht mehr effizient, da der Simulationszeitraum – anders als das Modellgebiet – nicht parallelisiert werden kann. In solchen Fällen setzt die BAW das eindimensionale Verfahren HEC-6T (MBH Software, 2014) ein. Auch dieses Programmsystem umfasst den gesamten Funktionsumfang: Hydrodynamik, Morphodynamik und anthropogene Maßnahmen.

Wenn besondere morphologische Prozesse, wie beispielsweise Transportkörperbildung, Transportvorgänge in komplexen Strömungsverhältnissen oder Interaktion von Morphodynamik und Bauwerk, einen entscheidenden Einfluss auf die zu bearbeitenden Fragen haben, werden für die Projektbearbeitung auch gegenständliche Modelle eingesetzt (Hentschel, 2014). Diese Modelle haben zwar grundsätzlich den Nachteil der Maßstabeffekte bei der Übertragung der Modellergebnisse auf den Naturmaßstab, jedoch bieten sie neben einer besonderen Anschaulichkeit eine große Naturähnlichkeit sowie ein natürliches stochastisches Verhalten. Soweit zweckmäßig, führt die BAW auch hybride Modellierungen durch, d. h. die numerischen und gegenständlichen Modelle werden parallel betrieben, um die Ergebnisse gegenseitig zu plausibilisieren und zu validieren.

Für Grundsatzuntersuchungen zu morphodynamischen Phänomenen und zur Verbesserung des Prozessverständnisses werden in der BAW auch Laboruntersuchungen in Systemrinnen durchgeführt. Unter diesen idealisierten Bedingungen können einzelne Phänomene isoliert betrachtet werden, und dies unter optimalen Messbedingungen.

Ein weiteres Standbein der morphodynamischen Untersuchungen der BAW bilden die Naturuntersuchungen, die eng mit den numerischen und gegenständlichen Modellen verzahnt sind (s. Abb. 1). Qualitativ hochwertige Simulationsmodelle lassen sich nur auf einer guten Datengrundlage realisieren, die einerseits die Basis für die Kalibrierung und Validierung der Modelle bildet und andererseits das Systemverständnis für die korrekte Interpretation der Modellergebnisse fördert. Bei Fragen der Sedimentbewirtschaftung kommt Tracerversuchen mit detektierbarem Material eine besondere Bedeutung zu, da sie z. B. die Möglichkeit bieten, Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Geschiebezugabematerial fraktionsweise zu erfassen.

3 Praxisbeispiele

3.1 Verbesserung der Geschiebezugabestrategie am Mittleren Niederrhein

Der Niederrhein befindet sich in einem ausgeprägten Erosionsregime mit weitreichenden Folgen für die Schifffahrt, die Wasserwirtschaft und den Naturhaushalt. In den 1990er-Jahren hat die Arbeitsgruppe „Rheinsohlenerosion“ unter Beteiligung der BAW ein Konzept für den gesamten frei fließenden Rhein mit dem Ziel entwickelt, für alle Streckenabschnitte ein dynamisches Sohlgleichgewicht herzustellen (BMV, 1997). Für die Erosionsstrecke am Niederrhein sah das Konzept zunächst vor, über einen Zeitraum von 12 Jahren an vier Stellen Geschiebe in einer Menge von jeweils 600.000 m³ künstlich zuzugeben (Messing, 2008). Erfahrungen bei der praktischen Umsetzung haben am Mittleren Niederrhein später dazu geführt, dass eine der Zugabestellen, die ursprünglich zwischen Rhein-km 750,0 und 760,0 geplant war, auf vier Zugabestellen zwischen Hamm (Rhein-km 734,0) und Krefeld (Rhein-km 763,5) aufgeteilt wurde, um die Zugaben besser an die örtlichen Gegebenheiten anpassen zu können.

Für eine künftige Optimierung der Zugabestrategie hinsichtlich Ort, Menge und Zusammensetzung des Geschiebematerials im Abschnitt des Mittleren Niederrheins betreibt die BAW gegenwärtig ein 2D-Feststofftransportmodell auf Basis des Programmsystems TELEMAC, das sich von Rhein-km 730,0 bis 776,5 erstreckt (s. Abb. 2). Ergänzend wurde ein 3D-Teilmodell für den Abschnitt „Neuss-Düsseldorf“ (Rhein-km 739,0 bis 749,0) aufgestellt. In diesem Abschnitt ist der Flusslauf durch starke Krümmungen geprägt. Ziel ist es, die Ergebnisse der 2D- und 3D-Modellierung miteinander zu vergleichen und damit Hinweise für die Anwendungsgrenzen des 2D-Modells zu gewinnen.

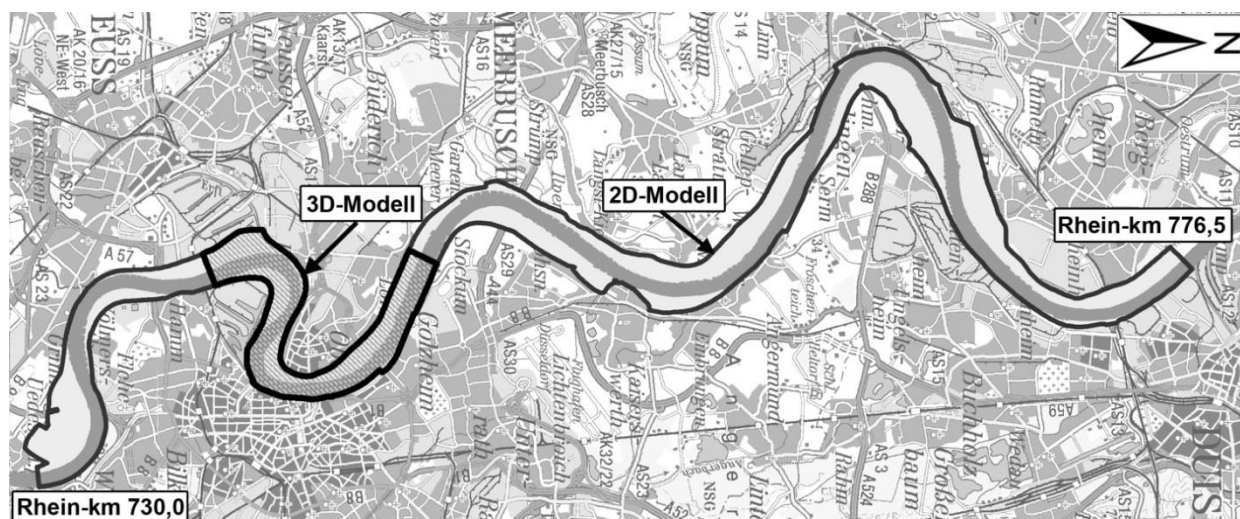


Abb. 2 2D-Modell „Mittlerer Niederrhein“ und 3D-Teilmodell „Neuss-Düsseldorf“

Das Morphodynamik-Modul SISYPHE ermöglicht es, den Geschiebetransport getrennt für einzelne Kornfraktionen zu betrachten. Im numerischen Modell können damit die Geschiebezugaben hinsichtlich Anzahl und Verteilung der eingesetzten Kornfraktionen an die örtlichen Gegebenheiten und Anforderungen angepasst und das Ausbreitungsverhalten der Materialzugabe im Detail analysiert werden (Schmidt et al., 2014). Abb. 3 zeigt die Ausbreitung und die Fraktionsanteile exemplarisch für eine feine (2 mm) und für eine grobe Kornfraktion (24 mm) nach einer Simulationszeit von einem Jahr.

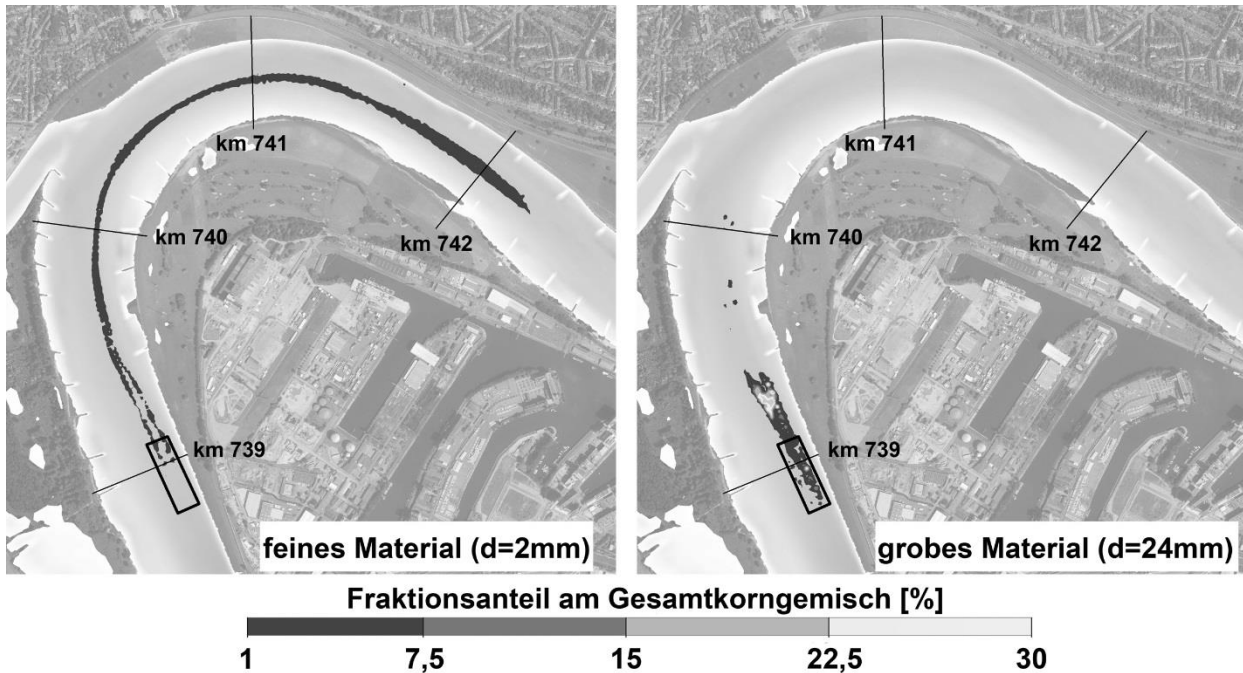


Abb. 3 Ausbreitung von zwei Fraktionen des Geschiebezugabematerials im numerischen 2D-Feststofftransportmodell nach einer Simulationszeit von einem Jahr

3.2 Optimierung der Unterhaltungssituation an der Einmündung des Elbe-Seitenkanals in die Elbe

In der Unteren Mittelelbe, stromab von Wittenberge, finden in regelmäßigen Abständen umfangreiche Unterhaltungsbaggerungen in der Fahrrinne statt. Ein Schwerpunkt ist der Stauraum der 1959 in Betrieb genommenen Staustufe Geesthacht, der zunehmend verlandet. Außergewöhnliche Hochwasserereignisse in den Jahren 2002, 2006, 2011 und 2013 haben das System zuletzt morphologisch überprägt.

Ein anderer Unterhaltungsschwerpunkt ist die Einmündung des Elbe-Seitenkanals (ESK) in die Elbe, die im Bereich der Stauwurzel der Staustufe Geesthacht liegt. Primäre Ursache für die Sedimentationen ist die Querschnittsaufweitung, verbunden mit einem komplexen Wirbelsystem im Mündungstrichter, das dort zu Ablagerungen von Geschiebe und Schwebstoffen aus der Elbe führt (s. Abb. 4). Die Lösungsvorschläge der BAW zielen darauf ab, dieses Wirbelsystem durch wasserbauliche Maßnahmen zu beeinflussen. Die Vorzugsvariante der zwischenzeitlich weitgehend abgeschlossenen Untersuchungen sieht vor, einen Teil des Mündungstrichters durch eine dammartige Insel zu verschließen und so die Scherzone zwischen Elbe und Trichter zu verkürzen. Sämtliche Maßnahmen müssen so geplant werden, dass sie nautisch und ökologisch verträglich sind und den Hochwasserschutz nicht verschlechtern (Heinzelmann et al., 2015).

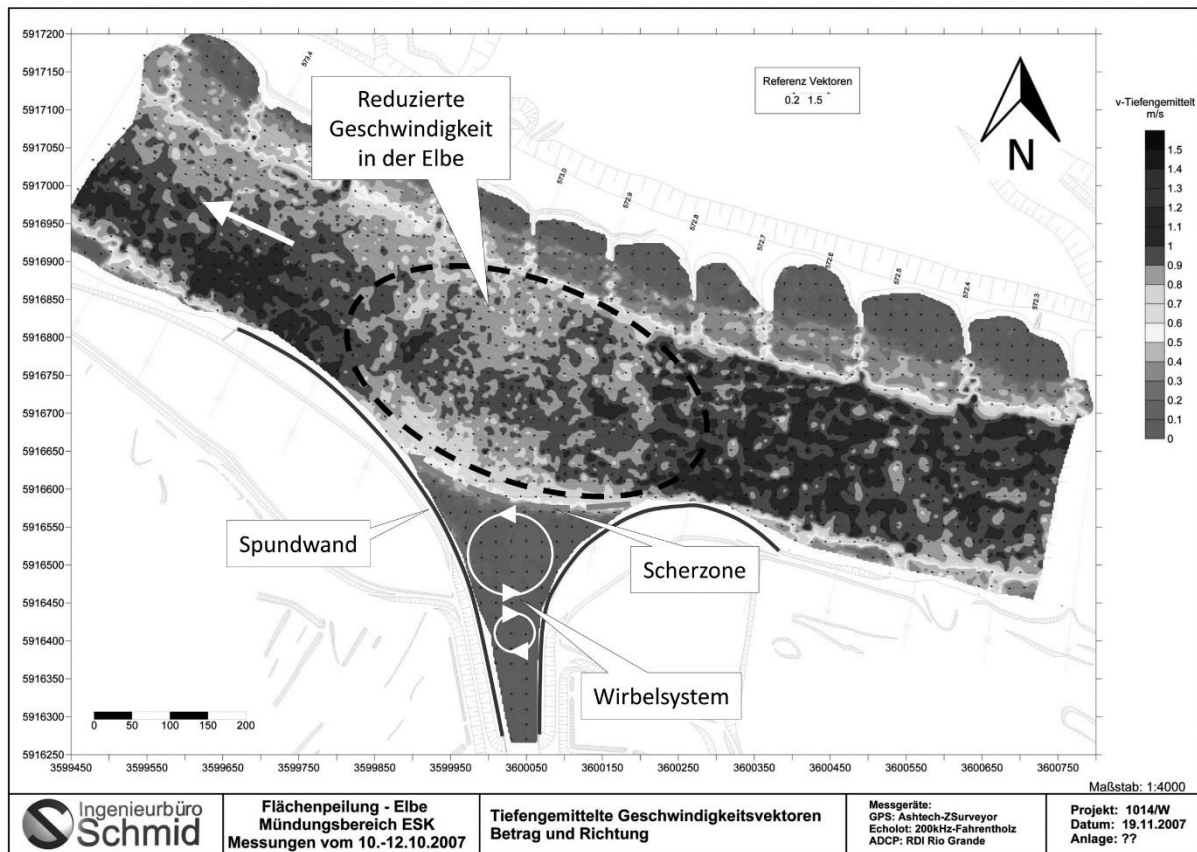


Abb. 4 Strömungsgeschwindigkeiten bei Mittelwasserabfluss (Heinzelmann et al., 2015)

Zu Beginn der Modelluntersuchungen wurden verschiedene hydronumerische Modellverfahren (2D und 3D) getestet. Dabei zeigte sich, dass die Strömungsmuster im Trichter nur schwer zu simulieren sind. Vor allem die vom Modellverfahren abhängige Behandlung der vertikalen Berandungen, in Verbindung mit der Parametrisierung der für die Wirbelausdehnung maßgeblichen Formrauheit der Spundwände, erwies sich als anspruchsvoll. Es wurde deutlich, dass die Fragestellung nur durch eine Kombination aus numerischer und gegenständlicher Modellierung zuverlässig beantwortet werden kann. So wurde zusätzlich zu den numerischen Untersuchungen ein großmaßstäbliches gegenständliches Modell (Längenmaßstab: 1 : 60, 2-fach überhöht) aufgebaut. Der große Vertikalmaßstab ist erforderlich, um auch im Bereich der Wirbel im Mündungstrichter ausreichend große Reynoldszahlen zu erreichen. An diesem Modell können die Auswirkungen von wasserbaulichen Maßnahmen auf den Massen- und Impulsaustausch zwischen Hauptstrom und Trichter im Detail veranschaulicht und mit modernen Messmethoden präzise quantifiziert werden. Die Ergebnisse können wiederum genutzt werden, um die numerischen Modellierungen zu validieren und ggf. zu verbessern. Die hydronumerischen Untersuchungen wiederum liefern Ergebnisse, die anschließend im Schiffs-führungssimulator der BAW genutzt werden, um die Auswirkungen der wasserbaulichen Lösungsvarianten auf die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffverkehrs zu analysieren und die Varianten ggf. fahrdynamisch zu optimieren.

Abb. 5 zeigt das gegenständliche Modell nach Einbau einer dammartigen Insel in Kombination mit einer Umlenkbohle. Ziel war es, eine geringfügige Hinterströmung des Dammes zu erreichen, die unterhalb des Dammes zu einer gleichmäßigen Ausströmung aus dem Trichter führt und damit den Eintrag von Schwebstoffen aus der Elbe verhindert.

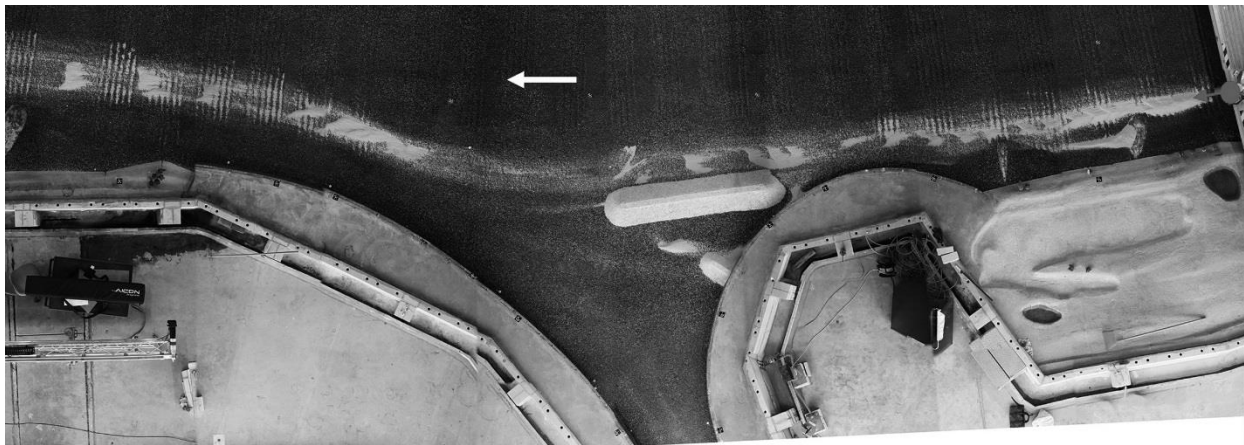


Abb. 5 Bewegung des Tracers nach Einbau der dammartigen Insel (Heinzelmann et al., 2015)

Abb. 6 veranschaulicht die Ergebnisse eines Farbversuchs im Modell. Als Tracer wurde im Hauptstrom Kaliumpermanganat (dunkel) und im Mündungstrichter Uranin (hell) verwendet. Die Bewegung der Farbpartikel zeigt die gleichmäßige Ausströmung entlang der Öffnung zwischen Damm und Spundwand.

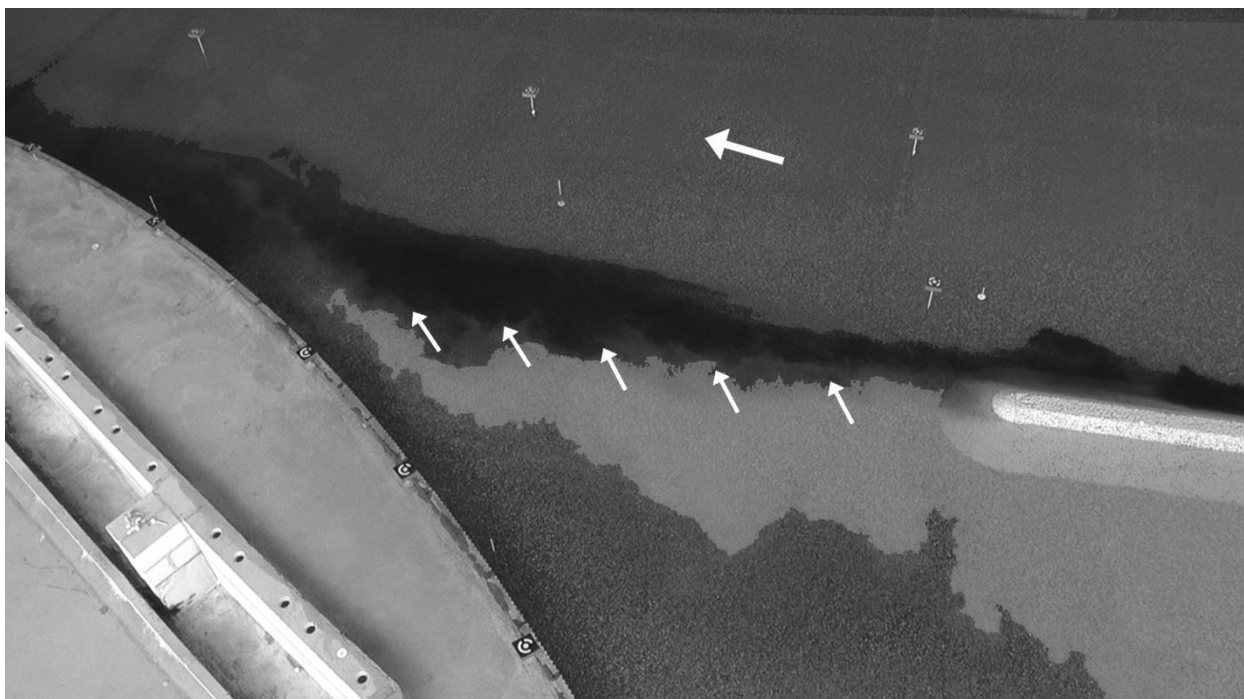


Abb. 6 Ausströmung aus dem Trichter ohne Wirbelbildung und Feststoffeintrag (Heinzelmann et al., 2015)

Die aufwändigen Untersuchungen der BAW stehen kurz vor dem Abschluss. Mit den vorgeschlagenen wasserbaulichen Maßnahmen kann der heutige Unterhaltungsschwerpunkt künftig wirksam entschärft werden. Die hybride Modellierung (gegenständlich, numerisch) hat wichtige Hinweise für die künftige Bearbeitung vergleichbarer Fragestellungen geliefert. Mit der Analyse im Schiffsführungssimulator kann der wasserbauliche Lösungsvorschlag auch unter fahrdynamischen Aspekten abgesichert werden. Dies garantiert eine verkehrswasserbauliche Lösung aus einem Guss.

3.3 Geschiebemanagementkonzept für den Donauausbau Straubing-Vilshofen

Im Rahmen der EU-Studie „Variantenunabhängige Untersuchungen zum Ausbau der Donau zwischen Straubing und Vilshofen“ hat die BAW in den letzten Jahren umfangreiche Gutachten (Hydraulik, Morphologie, Fahrdynamik) erarbeitet. Gefordert waren Unterlagen mit einem Detaillierungsgrad in Planfeststellungstiefe. Die durch politische Entscheidung im Jahre 2014 festgelegte Variante A sieht einen Ausbau der Wasserstraße vor, der ausschließlich mit flussregelnden Maßnahmen erfolgt. Ziel des verkehrlichen Ausbaus ist es, die heute vorhandenen Fahrrinntiefen zu vergrößern bzw. zu stabilisieren. Dies soll möglichst mit örtlich begrenzten Eingriffen erreicht werden. Neben Regelungsmaßnahmen, wie z. B. dem Neubau oder der Anpassung von Buhnen und Parallelwerken, sind auch Sohlensicherungsmaßnahmen durch Kolkverfüllungen vorgesehen.

Ein Untersuchungsschwerpunkt bestand darin, ein Geschiebemanagementkonzept für die Gesamtstrecke von 70 km und einen Prognosezeitraum von 25 Jahren aufzustellen. Für eine künftige Fahrrinntiefe von mindestens 2,20 m unter dem Regulierungswasserstand bei Niedrigwasserabfluss (RNW) sollten die Auswirkungen der langfristigen maßnahmenbedingten Sohlenhöhenänderungen auf die Wasserspiegellagen begrenzt werden. Gleichzeitig wurden die für ein dynamisches Sohlengleichgewicht im Ausbauzustand notwendigen Geschiebezugaben und -entnahmen prognostiziert.

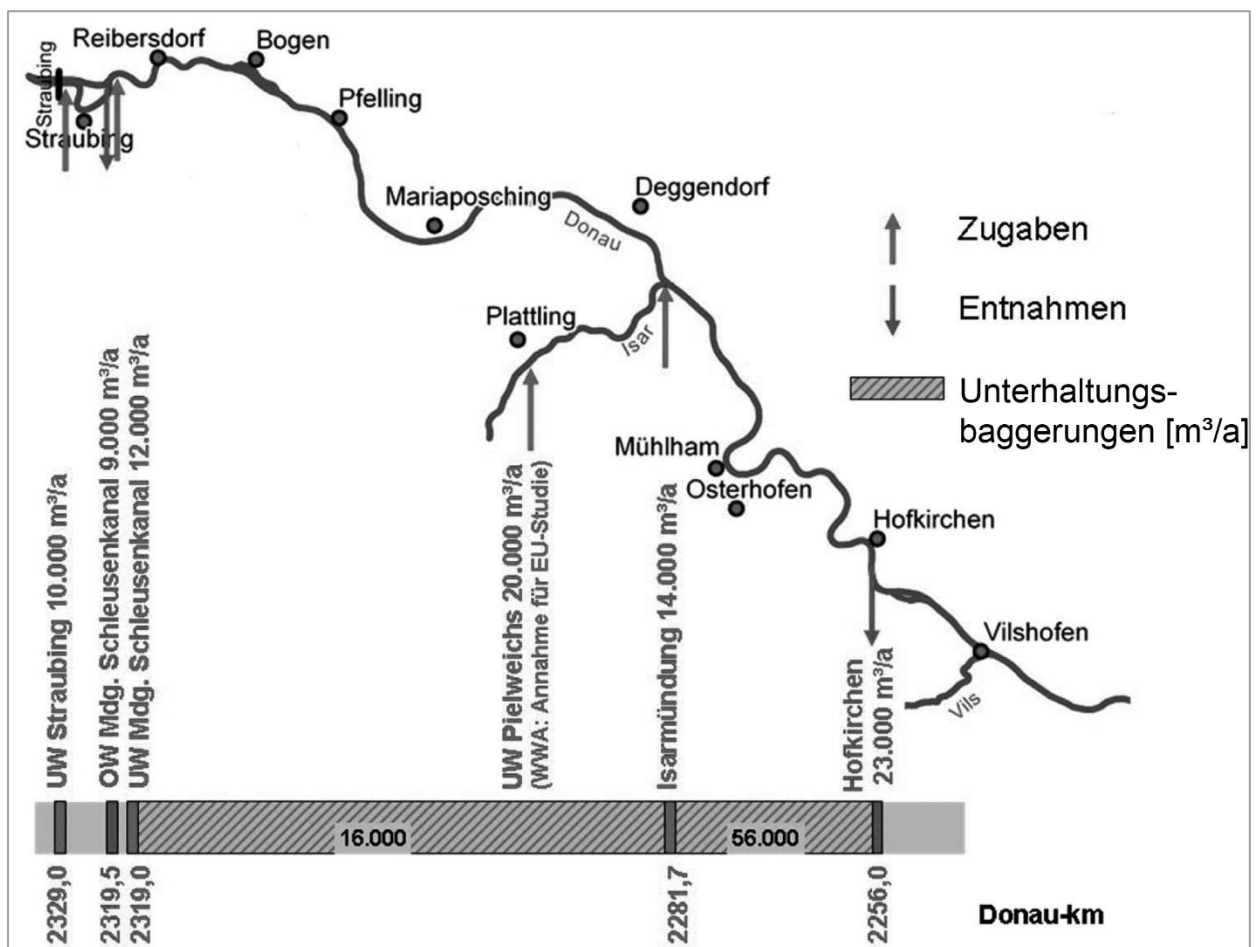


Abb. 7 Gesamtbewirtschaftungskonzept für Variante A

Für die Ermittlung der Geschiebezugaben und -entnahmen wurde ein großräumiges eindimensionales Feststofftransportmodell auf der Grundlage des Verfahrens HEC-6T aufgestellt. Um

den Einfluss des Abflussgeschehens auf die morphodynamischen Prozesse zu berücksichtigen, wurden die Prognosen für drei künstlich generierte Abflusszeitreihen mit unterschiedlichen hydrologischen Charakteristiken durchgeführt.

Die für den Ausbauzustand zu erwartenden Unterhaltungsbaggermengen wurden auf Basis eines zweidimensionalen numerischen Feststofftransportmodells prognostiziert. Da aufgrund begrenzter Rechenressourcen es nicht möglich war, die 70 km lange Gesamtstrecke in einem durchgängigen Modell zu simulieren, wurden für zwei charakteristische Abschnitte kürzere Modelle aufgebaut und anschließend die Unterhaltungsbaggermengen auf die Gesamtstrecke extrapoliert. Für die Prognoserechnung wurde die historische Abflussganglinie eines vierjährigen Zeitraums (2001 bis 2004) ausgewählt, der bezüglich der Hydrologie einerseits mittlere Verhältnisse widerspiegelt, andererseits aber auch extrem feuchte und extrem trockene Jahre enthält.

Das Gesamtbewirtschaftungskonzept für die Donau zwischen Straubing und Vilshofen ist in Abb. 7 dargestellt. Um die mit den Baumaßnahmen verbundenen Wasserspiegeländerungen zu begrenzen und Geschiebedefizite in der Strecke auszugleichen, wurden Geschiebezugaben und -entnahmen an den wesentlichen Stellen in das Modell integriert und im Rahmen der Prognoseberechnungen so lange variiert, bis sich ein dynamisches Sohlgleichgewicht eingestellt hat. Abb. 7 zeigt die Lage der Geschiebezugaben (Pfeil nach oben) und -entnahmen (Pfeil nach unten). Die prognostizierten Unterhaltungsbaggermengen sind über die Streckenabschnitte aggregiert dem Querbalken unter der Abbildung zu entnehmen.

Die Sohlenstabilität der am oberen Modellrand gelegenen Straubinger Schleife wird durch eine eigene Geschiebebewirtschaftung sichergestellt. Das zugegebene Material wird bei Do-km 2319,5 wieder entnommen, um Verlandungen an der Einmündung des Schleusenkanals in die Donau zu vermeiden, die ansonsten dort wegen der vergrößerten Abflussquerschnitte auftreten würden. Unterhalb der Einmündung des Schleusenkanals werden wiederum ca. 12.000 m³ Geschiebe pro Jahr benötigt, um die Strecke bis zur Isarmündung, die sich durch ein flaches Gefälle und eine eher geringe morphodynamische Aktivität auszeichnet, zu stabilisieren. Ausgehend von einer Geschiebezugabe in der Isar im Unterwasser der Staustufe Pielweichs von ca. 20.000 m³/Jahr werden im Bereich der Isarmündung weitere 14.000 m³ Geschiebe pro Jahr zugegeben, um die Sohle unterhalb der Isarmündung in einem dynamischen Gleichgewicht zu halten. Bei Hofkirchen werden in einem Geschiebefang ca. 23.000 m³/Jahr entnommen. Damit ist gewährleistet, dass das Material nicht in die unterhalb liegende Felsstrecke transportiert wird und dort zu unerwünschten Anlandungen führt.

Da die mit Variante A verbundenen zusätzlichen Stromregelungsmaßnahmen zu keiner deutlichen Erhöhung der Schubspannungen gegenüber dem Ist-Zustand führen, werden auch die Unterhaltungsbaggermengen nur geringfügig ansteigen. Während heute durchschnittlich 59.000 m³/Jahr gebaggert werden, sind künftig 72.000 m³/Jahr zu erwarten. Dabei konzentrieren sich die Baggerungen auf den morphodynamisch aktiveren und stärker geregelten Donauabschnitt unterhalb der Isarmündung.

4 Ausblick

Die numerische Modellierung morphodynamischer Prozesse stellt den Wasserbauingenieur noch immer vor große Herausforderungen, da insbesondere physikalische Prozesse des Feststofftransports nicht hinreichend geklärt sind und deshalb in Form von empirischen

Modellansätzen erfasst werden. Um auf diesem Gebiet künftig voranzukommen, sind weltweit erhebliche Forschungsanstrengungen erforderlich, an denen sich die BAW beteiligen wird.

Ein aktueller Forschungsschwerpunkt der BAW besteht darin, die Langfristsimulation von Feststofftransportvorgängen weiter zu verbessern. Die hydrologische Randbedingung, d. h. die Zustromganglinie in das Simulationsmodell, ist ein wichtiger Einflussfaktor für das morphodynamische Geschehen, der bislang aufgrund der methodischen Herangehensweise in Verbindung mit den verfügbaren Rechenressourcen nicht ausreichend berücksichtigt werden kann, da die simulierten Zeiträume häufig kurz sind und für Prognosen meist nur eine einzige hydrologische Realisation verwendet wird. Ein laufendes Forschungsvorhaben der BAW beschäftigt sich damit, durch implizite numerische Verfahren, die größere Zeitschrittweiten ermöglichen, eine deutlich verbesserte numerische Effizienz zu erreichen, sodass die Möglichkeit besteht, auf der Grundlage einer großen Anzahl von hydrologischen Realisationen belastbarere Prognosen zu erstellen. Durch eine geeignete stochastische Einbettung des Verfahrens soll künftig eine statistische Analyse der Prognoseergebnisse einschließlich der Angabe von Vertrauensintervallen erreicht werden.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt der BAW ist die Berücksichtigung verschiedener Unsicherheiten, die z. T. starke Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit der Modellergebnisse haben können. Bei der numerischen Modellierung werden Modellparameter und Eingangsdaten verwendet, die durch natürliche Variabilität, ungenaue Messungen oder wegen der ungenügenden Beschreibung der physikalischen Prozesse zum Teil erheblichen Schwankungsbreiten unterliegen. Mit Hilfe von Zuverlässigkeitsmethoden, die im Rahmen eines gerade abgeschlossenen Forschungsprojekts erarbeitet und getestet wurden, kann der Einfluss dieser Größen abgeschätzt und als Wahrscheinlichkeitsverteilung, Sensitivität oder Vertrauensintervall dargestellt werden. Der nächste Schritt ist die Integration dieser Zuverlässigkeitsanalysen in den Projektalltag der BAW.

Zwar kann in gegenständlichen Modellen auf eine empirische Beschreibung und der damit einhergehenden Parametrisierung insbesondere der Transportprozesse verzichtet werden, jedoch resultieren aus den Maßstabeffekten andere, nicht minder komplexe Frage. Durch die Auswahl eines Ähnlichkeitsgesetzes werden andere, für morphologische Prozesse ebenfalls relevante Ähnlichkeiten zwischen Modell und Natur ggf. nicht hinreichend oder durch eine Maßstabsüberhöhung nur näherungsweise erreicht. Bereits die maßstäbliche Verkleinerung von feinen fluvialen Sedimenten, wie sie in den Unterläufen der Wasserstraßen verbreitet vorkommen, stellt aufgrund des Übergangs von rolligen zu kohäsiven Sedimenten eine große Herausforderung dar. Aktuelle Forschungsarbeiten der BAW konzentrieren sich daher auf Möglichkeiten, Ersatzgeschiebe aus Kunststoff derart auszuwählen, dass ungleichförmige Sedimentmischungen, Transportformen wie z. B. Dünenbewegungen oder die Dynamik eines Schüttkegels im Modell naturähnlich abgebildet werden können. Durch umfangreiche Grundsatzuntersuchungen in Systemrinnen wird das morphologische Prozessverständnis auch in Bezug auf die Interaktion von flussbaulichen Maßnahmen und Morphodynamik stetig verbessert.

Literatur

BMV (1997): Sohlgleichgewicht am Rhein. Bericht der Arbeitsgruppe „Rheinsohlenerosion“, Bundesministerium für Verkehr, AG „Rheinsohlenerosion“, Münster/Mainz.

- Brudy-Zippelius, T.; Schmidt, A. (2014): Einsatz morphodynamischer Simulationsmodelle an Bundeswasserstraßen – Möglichkeiten und Grenzen. In: Herausforderung Sedimenttransport, BAW-Kolloquium Karlsruhe, 26.11.2014, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 21-27.
- Hervouet, J.-M. (2007): Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the Finite Element Method, Wiley, Chichester.
- Heinzelmann, C.; Schmidt, A.; Weichert, R. (2014): Methodeneinsatz bei morphologischen Fragestellungen an Bundeswasserstraßen. In: 37. Dresdner Wasserbaukolloquium 2014, 13.-14.03. 2014, Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen Heft 50, TU Dresden, 3-17.
- Heinzelmann, C., Hentschel, B., Willamowski, B (2015): Optimierung der Unterhaltungssituation an der Einmündung des Elbe-Seiten-Kanals in die Elbe. In: HTG-Kongress 2015, Bremen 9.-11.09.2015, Hafentechnische Gesellschaft e.V., Hamburg, 425-434.
- Hentschel, B. (2014): Einsatz gegenständlicher Modelle für morphodynamische Fragestellungen. In: Herausforderung Sedimenttransport, BAW-Kolloquium Karlsruhe 26.11.2014, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 65-70.
- Maerker, C.; Malcherek, A. (2010): The simulation tool DredgeSim – predicting dredging needs in 2- and 3-dimensional models to evaluate dredging strategies. In: River Flow 2010, International Conference on Fluvial Hydraulics, Braunschweig 8.-10.09.2010, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 1639-1645.
- MBH Software, Inc. (2014): User Manual Sedimentation in Stream Networks (HEC-6T), Clinton.
- Messing, S. (2008): Geschiebezugabe Unterer Niederrhein, Binnenschifffahrt 63(12), 67-70.
- Schmidt, A.; Backhaus, L.; Heinzelmann, C. (2014): Methoden zur Simulation morphodynamischer Prozesse in Binnenwasserstraßen, Korrespondenz Wasserwirtschaft 7(8), 456-461.
- Villaret, C., et al (2013): Morphodynamic modeling using the TELEMAC finite-element system, Computers & Geosciences 53(4), 105-113.

Anschrift der Verfasser

Prof. Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann
christoph.heinzelmann@baw.de

Dr.-Ing. Thomas Brudy-Zippelius
thomas.brudy-zippelius@baw.de

Dr.-Ing. Nils Peter Huber
nils.huber@baw.de

Bundesanstalt für Wasserbau
Kußmaulstraße 17, D-76187 Karlsruhe