

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Wenka, Thomas

Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte und Transportphänomene in morphodynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen. FuE-Abschlussbericht A395 301 70003

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105092>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

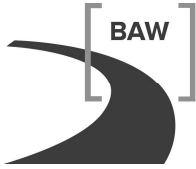
Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2015): Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte und Transportphänomene in morphodynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen. FuE-Abschlussbericht A395 301 70003. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

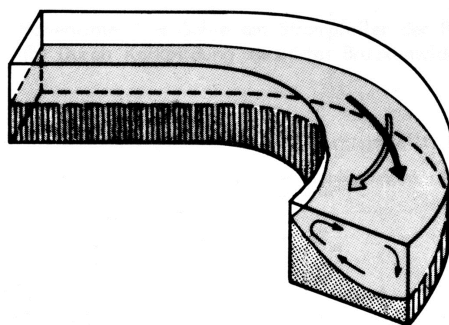


Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

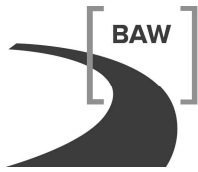
FuE-Abschlussbericht

**Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungs-
effekte und Transportphänomene in morpho-
dynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen**

A395 301 70003



November 2015



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

FuE-Abschlussbericht

Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte und Transportphänomene in morphodynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen

Beginn des Vorhabens: April 2011

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A395 301 70003

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Binnenbereich
 Referat: W5
 Projektleiter Dr. Thomas Wenka
 Bearbeiter: Thomas Wenka, Lars Backhaus (BAW),
 Jochen Riesterer (KIT)

Karlsruhe, November 2015

Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

Bundesanstalt für Wasserbau

Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe
Tel.: 0721 97 26-0 · Fax: 0721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg
Tel.: 040 81 908-0 · Fax: 040 81 908-373

Zusammenfassung

Den durch Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen an Bundeswasserstraßen induzierten morphodynamischen Nachlauf möglichst exakt zu berechnen, ist eine wesentliche Aufgabe der Abteilung Wasserbau im Binnenbereich. Dreidimensionale Effekte, die sich auf die Größe und Richtung der Sohlschubspannung und den Bewegungsbeginn auswirken, werden in 2D-tiefengemittelten numerischen Modellen durch Parameter abgebildet, die die Prognose des Sedimenttransports und die daran gekoppelte Morphogenese der Stromsohle maßgeblich beeinflussen.

Das FuE-Projekt „3D-Effekte in FTM“ wurde in einer engen Kooperation zwischen dem Referat W5 der BAW und dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) bearbeitet und nach einer Laufzeit von ca. 4,5 Jahren im November 2015 abgeschlossen. Es diente in erster Linie der Weiterentwicklung des Open Source Programmsystems TELEMAC-SISYPHE und der Auslotung seiner Möglichkeiten und Grenzen hinsichtlich der fraktionierten Geschiebetransportmodellierung in Bundeswasserstraßen auf der Grundlage einer 2D-tiefengemittelten, quasi-dreidimensionalen oder voll dreidimensionalen Erfassung der Strömung.

Die wesentlichen Erkenntnisse aus den zur Codeerweiterung und Modellanwendung erforderlichen Untersuchungen und Validierungen sind in mehreren Berichten des IWG „zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung“ ausführlich dargestellt. Der vorliegende FuE-Abschlussbericht konzentriert sich daher auf die wesentlichen Informationen zur Struktur, zum Ablauf und zur Dokumentation des Forschungsvorhabens.

Hinsichtlich der Möglichkeiten und Grenzen der bis dato eingesetzten Methoden kann ein Resümee auf die folgenden Kernaussagen zusammengefasst werden:

- Die mittels 3D-Modell berechnete Sekundärströmung, die Erfassung von Haupt- sowie Außenwirbeln stimmte gut mit den Natur- und Labordaten überein. Die 3D-Modellierung mittels hydrostatischen (quasi-3D) bzw. nicht-hydrostatischen (3D) Druckansatzes lieferte bei großen Breiten-/Tiefenverhältnissen (z.B. Niederrhein) lediglich geringe Unterschiede bzgl. der morphologischen Ergebnisse.
- Die Berücksichtigung des Einflusses der Sekundärströmung auf den Geschiebetransport im 2D-tiefengemittelten Modell zeigte generell gute Übereinstimmungen mit dem jeweiligen 3D-Modell. Die größten Differenzen traten im Bereich von Krümmungsübergängen auf. Durch eine räumliche Anpassung der Parameter des Sekundärströmungsansatzes an die jeweiligen Randbedingungen könnte die Prognosefähigkeit der 2D-Modellierung bezüglich Bedarf und erträglichem Mehraufwand gesteigert werden.
- Die Verwendung des Sekundärströmungsansatzes mit Entwicklungslänge führte im 2D-FTM des Labormäanders zu einer lokalen Verbesserung der morphologischen Ergebnis-

se. Im 2D-FTM des Niederrheinmäanders war jedoch keine relevante Verbesserung der Sohlentwicklung zu verzeichnen.

- Die neu implementierte Geschiebetransportformel nach Wu und der Ansatz nach Meyer-Peter und Müller lieferten in den getesteten Laboranwendungen vergleichbare morphologische Ergebnisse.
- Die verwendeten Ansätze zur Berücksichtigung des gravitativen Transports führten zu einer signifikanten Beeinflussung der morphologischen Ergebnisse bis hin zu unrealistischen Sohlentwicklungen. Die richtige Parameterwahl bzw. -justierung ist deswegen bei 2D- und 3D-Modellen von großer Bedeutung.

Die Ergebnisse lassen weitgehend darauf schließen, dass Quasi-3D-Modelle und vor allem 2D-tiefengemittelte Modelle für die an Bundeswasserstraßen typischen Breiten-/Tiefenverhältnisse den Einfluss der Sekundärströmung auf den Geschiebetransport ausreichend berücksichtigen. Unzulänglichkeiten in der 2D-Modellierung an Krümmungsübergängen können unter gewissem Mehraufwand behoben werden.

Generell musste festgestellt werden, dass die fraktionierte Transportmodellierung einen sehr hohen Modellierungsaufwand erzeugt, ohne ausreichend Klarheit bezüglich einer Aussage zur Prognosefähigkeit der untersuchten Ansätze zu schaffen. Das fraktionierte Transportmodell mit seiner Vielzahl von Freiheitsgraden stellt für den Anwender vor allem bei instationären Abflüssen ein sehr komplexes Modellierungswerkzeug dar, dessen Verhalten schwer einzuschätzen ist.

Da sich die o.g. Untersuchungen weitgehend auf deterministische Methoden beschränkten, sollten in einem künftigen FuE-Projekt primär stochastische Methoden betrachtet und aktuelle Ansätze bis hin zu einem Ansatz mit künstlichen neuronalen Netzen hinsichtlich ihrer Eignung für Problemstellungen an Bundeswasserstraßen getestet werden. Mit dem potentiellen Vorteil eines gegenüber fraktionierter FTM deutlich reduzierten Modellierungsaufwands können diese Methoden eine effiziente Alternative zur Lösung praktischer Problemstellungen darstellen.

(1) Titel		FuE-Abschlussbericht „Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte und Transportphänomene in morphodynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen“, Kurztitel: 3D-Effekte in FTM	
(2) Ort	(3) Wasserstr.-Nr.	(4) Kilometer von _____ bis _____	
(5) Projektleiter	Dr. Wenka		
(6) Bearbeiter	Dr. Wenka		
(7) Mitarbeiter	Dipl.-Ing. Backhaus (BAW), Dipl.-Ing. Riesterer (KIT)		
(8) Auftrags-Nr.	A395 301 70003		
(9) Auftragsdatum	17.10.2011	(10) aufgestellt am	27.11.2015
(11) Seitenzahl	(12) Sonderhinweise		
(13) Kurzfassung			
<p>Den durch Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen an Bundeswasserstraßen induzierten morphodynamischen Nachlauf möglichst exakt zu berechnen, ist eine wesentliche Aufgabe der Abteilung Wasserbau im Binnenbereich. Dreidimensionale Effekte, die sich auf die Größe und Richtung der Sohlschubspannung und den Bewegungsbeginn auswirken, werden in numerischen Modellen durch Parameter abgebildet, die die Prognose des Sedimenttransports und die daran gekoppelte Morphogenese der Stromsohle maßgeblich beeinflussen.</p> <p>Das FuE-Projekt „3D-Effekte in FTM“ wurde in einer engen Kooperation zwischen BAW und KIT bearbeitet. Es diente in erster Linie der Weiterentwicklung des TELEMAC-SISYPHE-Programmsystems und der Auslotung seiner Möglichkeiten und Grenzen hinsichtlich der fraktionierten Geschiebetransportmodellierung auf der Grundlage einer 2D-tiefengemittelten, quasi-dreidimensionalen oder voll dreidimensionalen Erfassung der Strömung.</p> <p>Die wesentlichen Erkenntnisse aus den Untersuchungen sind in mehreren Berichten des IWG ausführlich dargestellt. Der vorliegende FuE-Abschlussbericht konzentriert sich daher auf die wesentlichen Informationen zur Struktur, zum Ablauf und zur Dokumentation des Vorhabens.</p> <p>Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass Quasi-3D-Modelle und 2D-tiefengemittelte Modelle bei den Breiten-/Tiefenverhältnissen an Wasserstraßen den Einfluss der Sekundärströmung auf den Geschiebetransport ausreichend berücksichtigen. Unzulänglichkeiten in der 2D-Modellierung an Krümmungsübergängen können unter gewissem Mehraufwand behoben werden. Die Ansätze zum gravitativen Transport führten zu einer signifikanten Beeinflussung der morphologischen Ergebnisse bis hin zu unrealistischen Sohlentwicklungen. Die richtige Parameterwahl bzw. -justierung ist bei 2D- und 3D-Modellen von großer Bedeutung. Generell musste festgestellt werden, dass die fraktionierte Transportmodellierung einen sehr hohen Modellierungsaufwand erzeugt, ohne ausreichend Klarheit bezüglich einer Aussage zur Prognosefähigkeit der untersuchten Ansätze zu schaffen. Das fraktionierte Transportmodell mit seiner Vielzahl von Freiheitsgraden stellt für den Anwender vor allem bei instationären Abflüssen ein sehr komplexes Modellierungswerkzeug dar, dessen Verhalten schwer einzuschätzen ist.</p> <p>Da sich die o.g. Untersuchungen weitgehend auf deterministische Methoden beschränkten, sollten in einem künftigen FuE-Projekt primär stochastische Methoden betrachtet und aktuelle Ansätze bis hin zu einem Ansatz mit künstlichen neuronalen Netzen hinsichtlich ihrer Eignung für Problemstellungen an Bundeswasserstraßen getestet werden. Mit dem potentiellen Vorteil eines gegenüber fraktionierter FTM deutlich reduzierten Modellierungsaufwands können diese Methoden eine effiziente Alternative zur Lösung praktischer Problemstellungen darstellen.</p>			
(14) Standort	(15) Archiv-Nr.		

Inhaltsverzeichnis

Seite

1	Problemdarstellung und Ziel	1
1.1	Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens	1
1.2	Bedeutung für die WSV	2
2	Dokumentation	3
2.1	Berichte	3
2.2	Vorträge und Veröffentlichungen	4
3	Theoretische Grundlagen und Aspekte der numerischen Modellierung	5
4	Methodik und Untersuchungsprogramm	6
4.1	Arbeitsprogramm	6
4.2	Numerische Modelle	7
4.2.1	Testfall Mäanderrinne	7
4.2.2	Verfahrensvergleich in gerader Rechteckrinne	9
4.2.3	BAW-Rinne mit Einschnürung	9
4.2.4	Yen-Krümmen	11
4.2.5	Modellgerinne Universität Innsbruck	11
4.2.6	Donauschleife bei Mühlham	12
4.2.7	Rheinmäander im FTM „Neuss-Düsseldorf“	14
5	Ergebnisse	16
6	Empfehlungen und Ausblick	21
7	Literatur	22

Bildverzeichnis

Seite

Bild 1: Mäanderrinne im Labor und numerisches Modell (Initiale Bathymetrie)	8
Bild 2: Klassifizierung des Geschiebematerials, 4 Fraktionen	8
Bild 3: Gerade Rinne der BAW	9
Bild 4: Laborrinne mit Einengung der BAW	10
Bild 5: Klassifizierung des Geschiebematerials, 5 Fraktionen	10
Bild 6: Geometrie (Angaben in [m]) und Sieblinie bei Yen-Krümmen	11
Bild 7: Laborrinne der Universität Innsbruck	12
Bild 8: Modellgebiet „Mühlhamer Schleife“ / Sekundärströmung bei km 2266,85	13
Bild 9: FTM „Neuss-Düsseldorf“: Modellgrenzen, Geschwindigkeiten, Rechengitter	14
Bild 10: Klassifizierung des Geschiebematerials, 10 Fraktionen	15

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1** 1. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung (01. – 12.2010), März 2011.
- Anlage 2** 2. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung (04. – 12.2011), Feb. 2012.
- Anlage 3** 3. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung, SSIIM Verfahrensvergleich, März 2013.
- Anlage 4** Vergleich morphodynamischer Prognosen des Feststofftransportmodells Neuss-Düsseldorf in Abhängigkeit von 2D- und 3D-Strömungsansätzen mit dem Verfahren TELEMAC/SISYPHE. Diplomarbeit, Juli 2013.
- Anlage 5** Bericht zur Validierung dreidimensionaler Feststofftransportmodelle für Fragestellungen an den Bundeswasserstraßen, Juli 2014.
- Anlage 6** 4. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung – Endbericht, Mai 2015.
- Anlage 7** Bericht Validierungsfall Niederrheinmäander, November 2015.

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Morphologische Betrachtungen sind aufgrund der ausgedehnten Beobachtungszeiträume überwiegend großräumig und langfristig angelegt. Die Analyse der sohnnahen und somit bettbildenden Prozesse bedarf infolge des intensiven Zusammenspiels bathymetrischer, granulometrischer und strömungsmechanischer Effekte wiederum einer zeitlich und räumlich hoch auflösenden Betrachtungsweise. Obwohl die mikro- bis mesoskaligen Strömungsprozesse aufgrund der Turbulenz weitgehend stochastischer Natur sind, kommen in der Strömungsmodellierung vorrangig deterministische Methoden zum Einsatz mit dem Ziel, die integralen Prozesse anhand statistisch mittlerer Werte gut abbilden zu können.

Der als Bewegungsbeginn der Sohle bezeichnete Grenzzustand ist ein in der numerischen Modellierung des Sedimenttransports und der Evolution der Stromsohle maßgeblicher Parameter. Von der „Belastungsseite“ kommend, ist es die transportwirksame Sohlschubspannung, die es modelltechnisch zu erfassen gilt. Von der „Widerstandsseite“ aus betrachtet, sind es die Oberflächenrauheit (Korndurchmesser) bzw. Formrauheit (Unebenheiten, Transportkörper) und die Beschaffenheit der Kornmatrix (Lagerungseigenschaften), die in Bezug auf den Bewegungsbeginn eine entscheidende Rolle spielen.

Dreidimensionale Wirbelstrukturen der Strömung, die sich markant im Nahbereich von Regelungsbauwerken und in Gerinnekrümmungen ausprägen, wirken sich primär durch ihren Einfluss auf die sohnnahen Strömungsgeschwindigkeiten und die daran gekoppelten Sohlschubspannungen auf die bettbildenden Prozesse aus. Während die Strömungsseite in numerischen Modellen für morphologische Fragestellungen durch Wahl einer entsprechenden Skale (zeitlichen und räumlichen Auflösung) mit ausreichender Genauigkeit abgedeckt werden kann, ist es die Sohlseite mit all ihren Unwägbarkeiten, die aufgrund der schwachen Datenlage zu den allseits bekannten Unsicherheiten in der Prognose führt.

Eine genauere Betrachtung der die Widerstandsseite der Sohle betreffenden Prozesse würde jedoch den Rahmen der Untersuchungen sprengen. Vielmehr geht es vorrangig darum, die Wertigkeit dreidimensionaler Strömungseffekte als Einflussgrößen der Feststofftransportmodellierung (FTM) besser beurteilen zu können. Um Aufwand und Nutzen 2D-tiefen gemittelter oder dreidimensionaler FTM besser abwägen zu können und deren Prognosefähigkeit zu erhöhen, ist es im Rahmen dieses Forschungsvorhabens angebracht, die Nahstelle zwischen Strömung und Sohle genauer zu betrachten.

Vor diesem Hintergrund bildet die Evaluierung und ggfs. Weiterentwicklung von Sekundärströmungsansätzen in 2D-Modellen bei gleichzeitiger Überprüfung bestehender bzw. Implementierung neuer Schubspannungsansätze in den verwendeten 2D- und 3D-Verfahren

den Schwerpunkt der Untersuchungen. Die Frage nach dem Potential der dreidimensionalen Strömungsmodellierung, die morphodynamischen Prozesse im mesoskaligen Bereich besser als 2D-tiefengemittelte Modelle abbilden zu können, sollte ebenfalls beantwortet werden.

1.2 Bedeutung für die WSV

Den durch Bau-, Regelungs-, Instandhaltungs- und Geschiebebewirtschaftungsmaßnahmen an Bundeswasserstraßen induzierten „morphodynamischen Nachlauf“ möglichst gut abschätzen und detaillierter planen zu können, ist eine wesentliche Aufgabe der Abteilung Wasserbau im Binnenbereich bei der Beratung der planenden und ausführenden Instanzen der WSV. Hierzu bietet sich in der BAW der Einsatz numerischer Feststofftransportmodelle an. Solche Modelle liefern Prognosen zur Entwicklung der Sohle vor und nach einem baulichen Eingriff und können sowohl zum Nachweis der großräumigen und langfristigen Wirkung der Maßnahmen (1D-/2D-Modelle) wie auch zur Optimierung der Vorgehensweisen und Abläufe im Nahbereich des Eingriffs (2D-/3D-Modelle) eingesetzt werden.

Da der Bewegungsbeginn bekanntlich schon in Laboruntersuchungen eine sehr große Streubreite aufweist, ist seine modelltechnische Abbildung, die bislang auf der Wahl möglichst repräsentativer Transportformeln und zugehöriger Schwellenwerte beruht, mit einer entsprechenden Unschärfe gekoppelt, die sich wiederum maßgeblich auf die quantitative Erfassung von Sedimenttransport und Bettbildung in Binnenflüssen und -wasserstraßen auswirkt.

Als Ziel der Untersuchungen sollen dreidimensionale Strömungseffekte und die damit verknüpften Transportphänomene in den 2D-tiefengemittelten und 3D-Modellen, die auf der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung beruhen, adäquat erfasst werden. Ferner sollen die bisher in den numerischen Verfahren verwendeten Ansätze für den Bewegungsbeginn anhand von aktuellen Methoden, die ggfs. auf deterministischen, stochastischen oder gemischten Ansätzen beruhen, verfeinert werden. Durch deren Implementierung in die numerischen Modelle der BAW sollen die Planung von Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen und die Vorhersage von morphodynamischen Entwicklungstendenzen in Bundeswasserstraßen künftig zuverlässiger und genauer werden.

2 Dokumentation

Im Rahmen des FuE-Projektes „Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte und Transportphänomene in morphodynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen“ wurden im Zeitraum vom März 2011 bis November 2015 sechs Berichte sowie eine Diplomarbeit und acht weitere Veröffentlichungen angefertigt. Eine Dissertation, die derzeit am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) zu diesem Thema angefertigt wird, wird voraussichtlich im Laufe des Jahres 2016 nachgereicht werden.

Die Berichte und Veröffentlichungen sind nachfolgend in chronologischer Reihung genannt.

2.1 Berichte

- (1) IWG (2011): 1. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung (01. – 12.2010). Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, März 2011.
- (2) IWG (2012): 2. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung (04. – 12.2011). Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Feb. 2012.
- (3) IWG (2013): 3. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung, SSIIM Verfahrensvergleich. KIT, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, März 2013.
- (4) Backhaus, L. (2013). Vergleich morphodynamischer Prognosen des Feststofftransportmodells Neuss-Düsseldorf in Abhängigkeit von 2D- und 3D-Strömungsansätzen mit dem Verfahren TELEMAC/SISYPHE. Diplomarbeit, BAW, Referat Numerische Verfahren im Wasserbau / Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Juli 2013.
- (5) TUM (2014): Validierung dreidimensionaler Feststofftransportmodelle für Fragestellungen an den Bundeswasserstraßen. Bericht, Institut für Wasser und Umwelt, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München, Juli 2014.
- (6) IWG (2015a): 4. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung – Endbericht. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Mai 2015.
- (7) IWG (2015b): Bericht Validierungsfall Niederrheinmäander. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, November 2015.

2.2 Vorträge und Veröffentlichungen

- Backhaus, L. (2014): Geschiebezugabe Mittlerer Niederrhein – Vergleich morphodynamischer Prognosen des Feststofftransportmodells „Neuss-Düsseldorf“ in Abhängigkeit von 2D- und 3D-Strömungsansätzen mit dem Verfahren TELEMAC/SISYPHE. Vortrag am 22. Mai 2014, HTG-Kongress, 21. – 23. Mai 2014, Berlin.
- Backhaus, L.; Brudy-Zippelius, T.; Wenka, T.; Riesterer, J. (2014): Comparison of Morphological Predictions in the Lower Rhine River by Means of a 2-D and 3-D Model and in situ Measurements. Konferenzband der River Flow 2014, International Conference on Fluvial Hydraulics, 3. – 5. September 2014, Lausanne.
- Backhaus, L.; Riesterer, J. (2014): Einsatz morphodynamisch-numerischer Methoden am Beispiel eines Niederrheinmäanders. Konferenzband zum Kolloquium „Herausforderung Sedimenttransport – Methoden und Konzepte im Flussbau“, Bundesanstalt für Wasserbau, 26. November 2014, Karlsruhe.
- Riesterer, J.; Grafmüller, T.; Wenka, T. (2013): Comparison of hydraulic and morphological predictions of TELEMAC-3D/SISYPHE and SSIIM in curved laboratory channels. Konferenzband der XXth TELEMAC-MASCARET User Conference, Bundesanstalt für Wasserbau, 16. – 18. Oktober 2013, Karlsruhe.
- Riesterer, J.; Wenka, T.; Oberle, P.; Brudy-Zippelius, T. (2014): Numerische Modellierung des Geschiebetransports in gekrümmten Gerinnen. Konferenzband des 37. Dresdner Wasserbaukolloquiums 2014, 13. – 14. März, Dresden.
- Riesterer, J.; Brudy-Zippelius, T.; Wenka, T.; Nestmann, F. (2016): Multidimensional Bed Load Transport Modelling of a Secondary Flow influenced Curved Channel. (Zur Veröffentlichung im IAHR Journal of Applied Water Engineering and Research eingereicht)
- Schmidt, A.; Backhaus, L.; Heinzelmann, C. (2014): Methoden zur Simulation morphodynamischer Prozesse in Binnenwasserstraßen. KW - Korrespondenz Wasserwirtschaft, Nr. 8, August 2014, Seiten 456-461, DWA, Verlag GFA.
- Wenka, T.; Schmidt, A.; Brudy-Zippelius, T. (2015): Consideration of three-dimensional flow and transport phenomena in morphological models of inland waterways. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress 2015, 28. June – 3. July 2015, Den Haag.

3 Theoretische Grundlagen und Aspekte der numerischen Modellierung

In den Untersuchungen wurden mit der Modellierung von Sohlschubspannung und Sekundärströmung zwei wesentliche Einflussfaktoren auf den Geschiebetransport betrachtet.

Als Maß für die Scherkräfte entlang der Flusssohle ist die Sohlschubspannung maßgeblich an dem Verhalten von Sedimenten an der Gewässersohle und dem Geschiebetransport beteiligt. Sie korreliert mit den berechneten Strömungsgeschwindigkeiten und geht direkt in die Schwellenwertmodelle für den Geschiebetransport ein. Der in mehrdimensionalen Modellen und auch in TELEMAC-2D und -3D überwiegend angewandte Ansatz zu Bestimmung der Sohlschubspannung ist der Ansatz nach Nikuradse (1933), der auf einer logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung in vertikaler Richtung beruht.

In den zweidimensionalen Modellen werden die Sohlschubspannungen anhand der tiefen gemittelten Geschwindigkeiten und den Wassertiefen, in den dreidimensionalen Modellen anhand der Geschwindigkeiten in einem definierten Abstand von der Sohle berechnet.

Den Konzepten, die die Geschwindigkeitsschwankungen in Sohlnähe zur Bestimmung der Sohlschubspannung heranziehen, liegt die Vorstellung zugrunde, dass die Sohlschubspannung neben den mittleren Geschwindigkeiten auch mit den turbulenten Schwankungen skaliert. In turbulenten Grenzschichten besteht demnach eine lineare Beziehung zwischen der turbulenten kinetischen Energie (TKE) und der Sohlschubspannung. Zur Bestimmung der Sohlschubspannung aus gemessenen Geschwindigkeitsschwankungen wird in der Fließgewässerhydraulik in der Regel der Maximalwert der TKE zugrunde gelegt, der erfahrungsgemäß bei etwa einem Zehntel der Fließtiefe liegt (Rodi, 1984) und in einem Bereich oberhalb der viskosen Unterschicht weitgehend konstant bleibt (Nezu und Nakagawa, 1993). Biron et al. (2004) vergleichen unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung der Sohlschubspannung in Laboruntersuchungen in einem Rechteckkanal mit abrupter, seitlicher Querschnittseinschnürung und -aufweitung. Aus der Streuung der Ergebnisse wird ersichtlich, dass die Bestimmung der Sohlschubspannung starken Unsicherheiten unterliegt.

Sekundärströmungen spielen als dreidimensionales Phänomen eine große Rolle bei der Geschiebetransportsimulation. Sie liegen in einer Ebene quer zur mittleren Hauptströmungsrichtung, so dass bei stationären Bedingungen die mittlere Sekundärströmung in jeder Vertikalen der Ebene gleich null ist. Die Sekundärströmungsvektoren in Sohlnähe überlagern die Vektoren der Hauptströmung, nehmen Einfluss auf den Geschiebetransport und prägen somit die Flussmorphologie. Eine möglichst exakte Erfassung der Sekundärströmung und deren Effekte ist folglich eine Vorbedingung zur erfolgreichen Strömungs- bzw. Geschiebetransportsimulationen in Flusskrümmungen.

Die Grundlagen sind in IWG (2011), IWG (2012) und IWG (2015a) ausführlich dargestellt.

4 Methodik und Untersuchungsprogramm

Die aktuellen Ansätze, die derzeit in der numerischen Modellierung flussbaulicher Problemstellungen eingesetzt werden, wurden in einer Literaturstudie des Instituts für Wasser und Umwelt der TU München „Alternative Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransports in Fließgewässern“ (TUM, 2011) für die BAW zusammengestellt und untersucht, inwiefern sich alternative Methoden speziell auf die Problemstellungen der BAW anwenden lassen. Da die vorliegenden Untersuchungen primär der Weiterentwicklung der numerischen Methoden der BAW im Bereich des Flussbaus dienen, stand zur Umsetzung geeigneter Konzepte das TELEMAC-SISYPHE-System der Electricité de France (EDF) im Vordergrund.

Das Finite-Elemente-Verfahren TELEMAC-2D löst die tiefengemittelten Flachwassergleichungen und dient der Modellierung von instationären Strömungs- und Transportprozessen in Gewässern mit freier Oberfläche. Neben der 2D- tiefengemittelten Version ermöglicht TELEMAC-3D eine Lösung der reynoldsgemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) in den drei Raumrichtungen. Hierbei kann zwischen einem vereinfachten hydrostatischen Ansatz („quasi-3D“) und einem nicht-hydrostatischen Ansatz gewählt werden. Die diskrete Lösung der Gleichungssysteme erfolgt auf einem in horizontaler Richtung unstrukturierten Dreiecksgitter. Die vertikale Richtung wird mittels eines Sigma-Gitters diskretisiert.

Die Aufgabenpakete wurden inhaltlich mit dem Fachkonzept des Referats W5 (BAW, 2010) abgestimmt, so dass neue Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt unmittelbar Eingang in die Projektarbeit finden konnten. Die fachliche Integration der bestehenden Forschungskooperation mit dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) wurde für das geplante FuE-Vorhaben vorgesehen, um eine möglichst enge Verknüpfung der einzelnen Forschungsarbeiten zu ermöglichen.

4.1 Arbeitsprogramm

Im Rahmen der Weiterentwicklung des TELEMAC-SISYPHE-Systems der BAW wurde die modelltechnische Erfassung der Sekundärströmungseinflüsse und der Sohlschubspannung in 2D-tiefengemittelten Modellen im Vergleich zu 3D-Modellen untersucht und vor dem Hintergrund der Feststofftransportmodellierung und Morphodynamik analysiert. Die numerische Modellierung der den Sedimenttransport einerseits antreibenden (Bewegungsbeginn, gravitativer Transport), andererseits hemmenden Prozesse (Abpflasterung, Geschiebedargebot) spielte diesbezüglich ebenfalls eine wesentliche Rolle.

Alternative Geschiebetransportansätze (Wu et al., 2000) und Ansätze zur Berücksichtigung der Sohlschubspannungen (Biron et al., 2004) wurden anhand diverser Laboruntersuchun-

gen in geraden und mäandrierenden Gerinnen validiert und im FTM „Neuss-Düsseldorf“ hinsichtlich ihrer Eignung für Binnenwasserstraßen getestet.

Mit Anwendung und Validierung eines durch die EDF neu in TELEMAC-2D implementierten Dispersionsansatzes und dessen Erweiterung wurde das Thema „Modellierung des Sekundärströmungseinflusses“ abgeschlossen. Zur Bewertung des Dispersionsansatzes hinsichtlich seiner hydraulischen und morphologischen Auswirkungen wurden vergleichende 2D- und 3D-Simulationen anhand vorhandener Labormodelle bzw. Naturstrecken mit entsprechenden Messdaten durchgeführt.

Den Schwerpunkt der naturmaßstäblichen Simulationen und vergleichenden Betrachtungen stellte das FTM „Neuss-Düsseldorf“ (Rhein-km 739,0 – 749,0), das als 2D- und 3D-Modell mit identischer Diskretisierung in der Horizontalen aufgebaut wurde. Dieser Testfall (IWG, 2015b) wurde aufgrund seiner guten Datenlage detailliert und umfassend als ein Validierungsbeispiel aufbereitet, das kontinuierlich ergänzt und aktualisiert wird und auch anderen Verfahren und Institutionen zu Verfügung gestellt werden kann.

Zur Validierung der softwaretechnischen Umsetzung wurden diejenigen Untersuchungen in Labormodellen und Naturstrecken herangezogen, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

4.2 Numerische Modelle

4.2.1 Testfall Mäanderrinne

Die Untersuchungen von Wormleaton et al. (2005) in einer Mäanderrinne, die als Rechteckprofil mit alluvialer Sohle in eine 10 m breite und 60 m lange Versuchsrinne eingebettet war, waren auf die Erfassung der Sekundärströmung und deren Einfluss auf den Geschiebetransport und die Ausformung von Krümmungsübergängen ausgerichtet. Das 35 m lange sinusförmige Gerinne weist eine Sinuosität von 1,34 und eine Wellenlänge von 14,96 m auf.

Das Sedimentmaterial wurde so gewählt, dass die Entstehung von Riffeln verhindert wurde und es nur teilweise mobilisiert werden konnte, um Sortierungseffekte zu ermöglichen. Zu Beginn der Versuche wurde eine geglättete Sohle mit gut durchmischem Materialaufbau hergestellt. Mittels eines Rezirkulationssystems wurde das am unteren Modellrand ausgetragene Material am oberen Modellrand wieder hinzugegeben.

Zum Vergleich der Berechnungsergebnisse konnte lediglich auf vier Querprofile mit Auswertungen der Sohlhöhenentwicklung und ein Luftbild der Sohle am Ende des bordvollen Experiments zurückgegriffen werden. Die Querprofilauswertungen befinden sich im mittleren

Abschnitt der Modellstrecke (vgl. Bild 1) und decken sowohl den Anlauf- als auch den Krümmungsbereich einer Mäanderschleife ab.

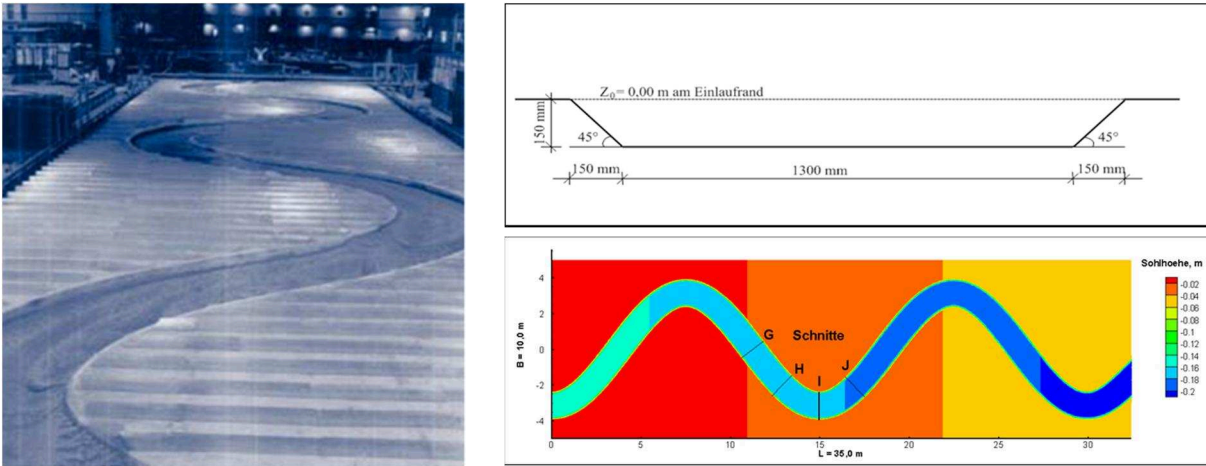


Bild 1: Mäanderrinne im Labor und numerisches Modell (Initiale Bathymetrie)

Im Rahmen der numerischen Modellierung des bordvollen Experiments wurden für spezifische Modellparameter (Sekundärströmung und gravitativer Transport) die Auswirkungen auf die Morphologie untersucht und mit den vorhandenen Messwerten des Labormodells verglichen. Aus den wenigen Laborwerten $d_{16} = 0,35 \text{ mm}$, $d_{50} = 1,33 \text{ mm}$ und $d_{84} = 3,19 \text{ mm}$ wurden für die numerische Modellierung die in Bild 2 aufgeführten 4 Kornfraktionen definiert. Sensitivitäten bezüglich der fraktionierten Geschiebetransportmodellierung wurden anhand unterschiedlich diskretisierter Kornverteilungen (zwei, vier und sechs Fraktionen) untersucht.

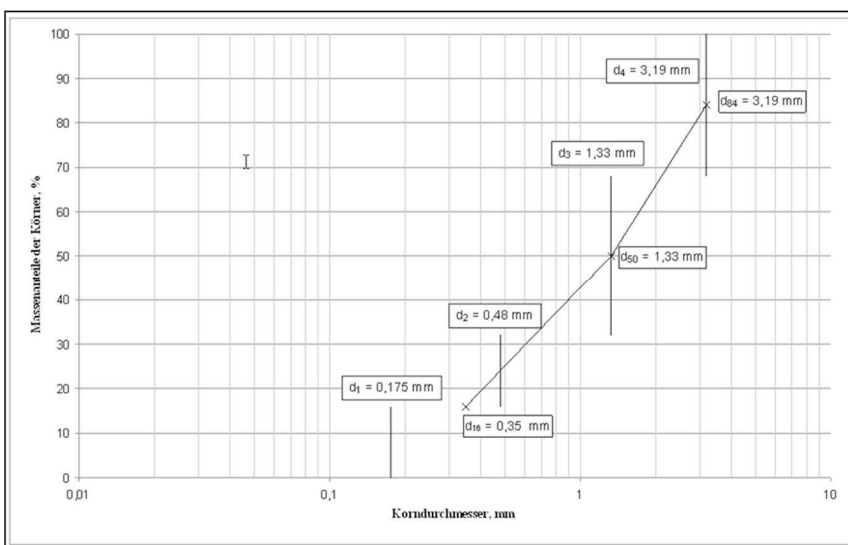
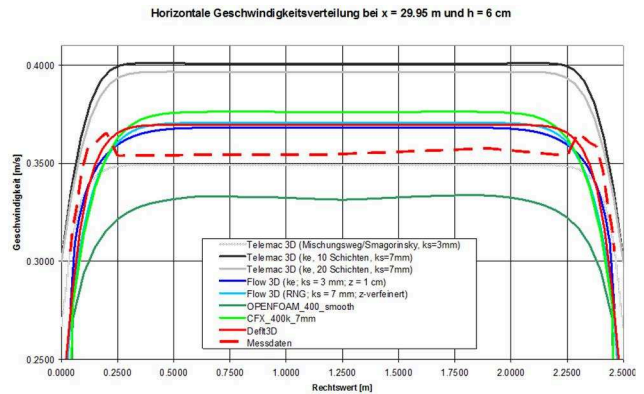


Bild 2: Klassifizierung des Geschiebematerials, 4 Fraktionen

Die Untersuchungen und erforderlichen Nachuntersuchungen sind jeweils in den einzelnen Zwischenberichten IWG (2011), IWG (2012) und IWG (2013) sowie dem Projektabschlussbericht IWG (2015a) dokumentiert.

4.2.2 Verfahrenvergleich in gerader Rechteckrinne



Geschwindigkeitsprofile im numerischen Modellvergleich

Bild 3: Gerade Rinne der BAW

In der etwa 70 m langen und 2,5 m breiten Rinne mit einem Gefälle von 0,6‰ der BAW wurde ein gleichförmiger Abfluss von $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ bei einer Wassertiefe von ca. 12,5 cm eingestellt (Bild 3). Die sich im sohnahen Bereich einstellenden Geschwindigkeitsverteilungen wurden im Labormodell mittels hoch auflösender Messtechnik untersucht, um vergleichende Betrachtungen zwischen unterschiedlichen numerischen Verfahren und den vorhandenen Messdaten durchführen zu können. Der darauf basierende Vergleich wurde mit den numerischen Verfahren TELEMAC-3D, Flow-3D, Delft-3D, CFX und OpenFoam durchgeführt. Die Untersuchungen sind ausführlich in IWG (2012) und IWG (2013) dokumentiert.

4.2.3 BAW-Rinne mit Einschnürung

Zur Untersuchung des Geschiebetransports bei Einschnürung und Aufweitung des Fließquerschnitts wurde in der BAW ein 1,0 m breiter Rechteckkanal mit horizontaler Sohle über eine Strecke von ca. 5 m auf 0,5 m eingeengt (Bild 4). In den Laborversuchen von 2007 (BAW, 2009), die in den numerischen Untersuchungen mittels 2D- und 3D-Modellen nachgefahren wurden, war die bewegliche Sohle aus Kies mit Korngrößen von $d = 2$ bis 8 mm aufgebaut. Die Kornverteilung wurde für die morphologischen Berechnungen in 5 Fraktionen unterteilt (Bild 5).

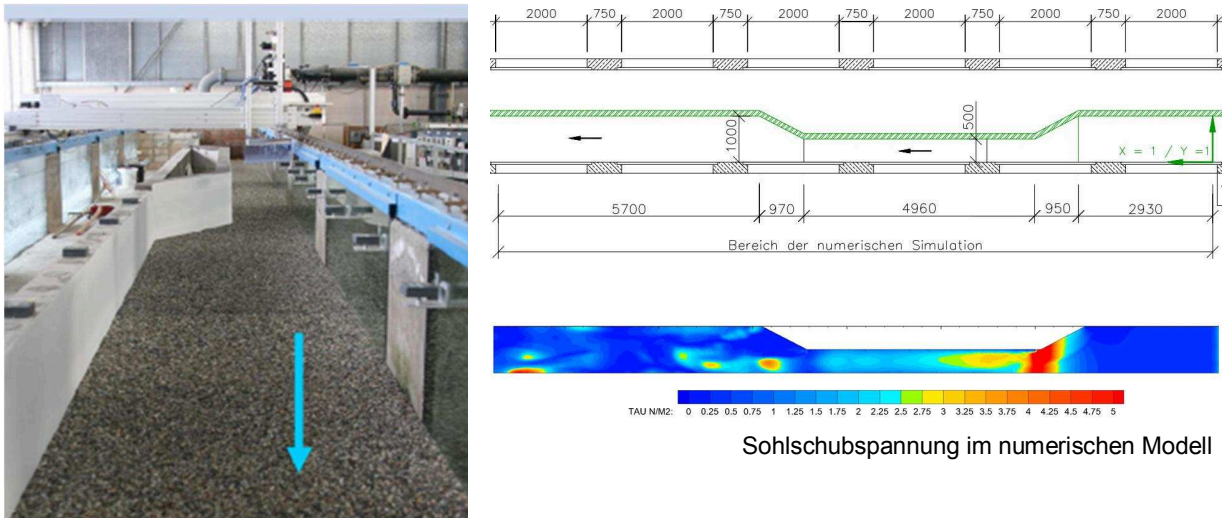


Bild 4: Laborrinne mit Einengung der BAW

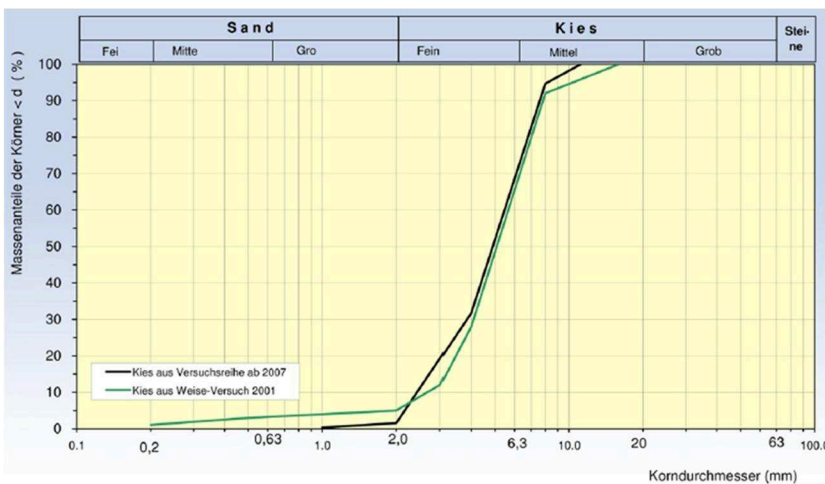


Bild 5: Klassifizierung des Geschiebematerials, 5 Fraktionen

Vergleichend zur MPM-Formel (Meyer-Peter und Müller, 1949) wurde in den Simulationen der BAW-Rinne auch der neu in SISYPHE implementierte Transportansatz nach Wu et al. (2000) verwendet, in dem Hiding-Exposure-Effekte direkt berücksichtigt werden können. Außerdem wurde neben dem üblichen Sohlschubspannungsansatz nach Nikuradse ein Ansatz verwendet, in dem die Sohlschubspannung unter Berücksichtigung der sohlnahen im $k-\epsilon$ -Modell bestimmten kinetischen Energie berechnet wird und ein weiterer Vergleich zwischen hydrostatischem und nicht-hydrostatischen Ansatz im 3D-Modell vorgenommen.

Die Untersuchungen sind ausführlich in IWG (2015a) dokumentiert.

4.2.4 Yen-Krümmen

Yen und Lee (1995) untersuchten die durch eine krümmungsinduzierte Sekundärströmung beeinflusste Entwicklung der Sohltopographie in einem Rechteckkanal mit 180°-Krümmer (Bild 6) bei instationären Abflüssen. Da bei einer Fließtiefe von $h = 0,0544$ m, einem stationären Abfluss von $Q = 0,02$ m³/s und einem Längsgefälle von 2 ‰, noch keine Feststoffbewegung stattfand, konnte diese Abflusskonstellation für den hydraulischen Vergleich der Verfahren SSIIM und TELEMAC-3D herangezogen werden. Für die morphologischen Analysen im Vergleich der beiden 3D-Modelle diente das Experiment, in dem der Abfluss kontinuierlich von 0,02 m³/s ($h = 0,0544$ m) auf 0,053 m³/s ($h = 0,103$ m) gesteigert wurde. Die Kornverteilung des dabei verwendeten Sohlmaterials ist in Bild 6 dargestellt.

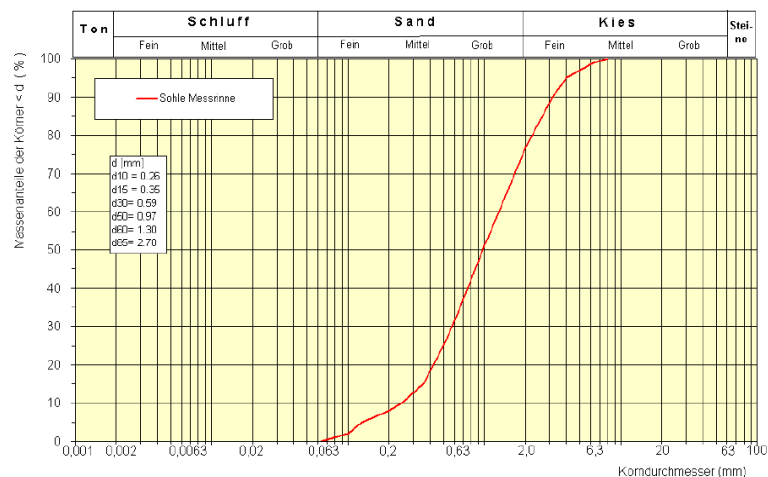
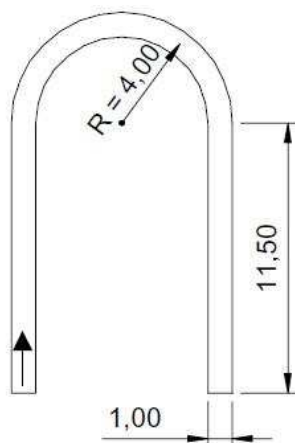


Bild 6: Geometrie (Angaben in [m]) und Sieblinie bei Yen-Krümmen

Während mit SSIIM als reinem 3D-Verfahren die Impulsgleichungen in allen drei Raumrichtungen gelöst wurden, wurde im Telemac-3D-Modell vereinfachend eine hydrostatische Druckverteilung angenommen. Ferner wurden in beiden Modellen unterschiedliche Turbulenz- und Wandreibungsansätze verwendet.

Die Untersuchungen sind ausführlich in IWG (2013) dokumentiert.

4.2.5 Modellgerinne Universität Innsbruck

Im Labor des Instituts für Wasserbau der Universität Innsbruck wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts zur Strömungsentwicklung in gekrümmten Gerinnen ein Mäandermodell mit beweglicher Sohle betrieben (Feurich, 2002). Das Modell mit zwei gegenläufigen Kreisbögen bestand aus einer 3 m langen Anlaufstrecke, an das sich zwei gegenläufige Kreisbögen mit einem Radius von 4 m und einem Öffnungswinkel von 60° und ein gerader Auslauf-

bereich von 2,8 m Länge anschließen. Die Sohlbreite des Trapezgerinnes mit fixierten Ufern und einer Uferneigung von 2 : 3 betrug $B = 1$ m (Bild 7).

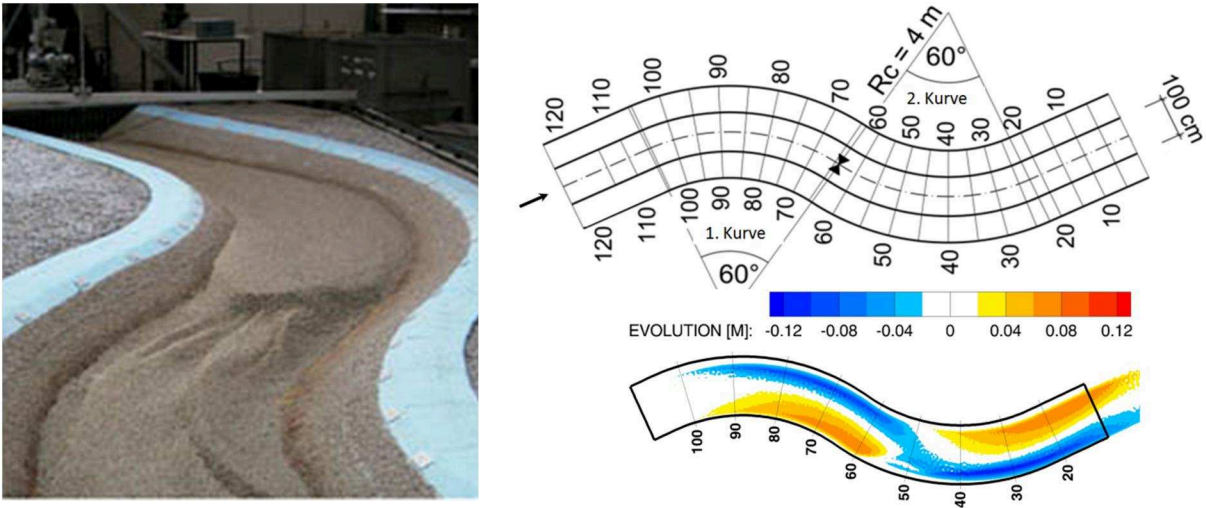


Bild 7: Laborrinne der Universität Innsbruck

Das Gefälle des Laborgerinnes lag im vorliegenden Untersuchungsfall bei 0,5 % und die im Anfangszustand 20 cm dicke bewegliche Sohle wurde jeweils aus „einkörnigem“ Quarzkies mit $d_m = 4,2$ mm bzw. $d_m = 6,4$ mm aufgebaut. Die natürliche Rauheit der Uferböschungen wurde durch Fixierung eines Sand-Kies-Gemisches ($d_{50} = 14,4$ mm) nachgebildet. Bei der Durchführung der Versuche wurden stationäre Abflussverhältnisse und mittels automatischer Geschiebebezugaben am Einlauftrand Equilibrium vorgegeben. Die Versuche, die bis zum Erreichen konstanter Sohlhöhen im Labormodell betrieben wurden, wurden numerisch in 2D- und 3D-Modellen nachgefahren. Vergleichende numerische Untersuchungen in einem auf SSIIM basierendem 3D-Modell mit gleichförmigem und ungleichförmigem Sediment wurden von Feurich und Olsen (2011) durchgeführt.

Die Untersuchungen sind ausführlich in IWG (2015a) dokumentiert.

4.2.6 Donauschleife bei Mühlham

Zur Analyse der unterschiedlichen Einflussfaktoren auf den Geschiebetransport und deren messtechnische bzw. numerische Erfassung wurde das Modell der „Mühlhamer Schleife“ (Donau-km 2263 bis Donau-km 2275) ausgewählt, für das in der BAW Ergebnisse aus numerischen Simulationen und Daten aus umfangreichen Messkampagnen an der Donau vorlagen. Ein Hauptaugenmerk der Untersuchungen lag auf der Erfassung und Visualisierung der Sekundärströmung aus den Geschwindigkeitsmessungen und deren direktem Vergleich mit den Simulationsergebnissen. Mit der Extrahierung und der Sekundärströmung aus hoch aufgelösten Messdaten und der Möglichkeit einer Gegenüberstellung mit 3D-

Modelldaten sollte auch deren Auswirkung auf den Geschiebetransport in 2D-tiefengemittelten Modellen untersucht werden.

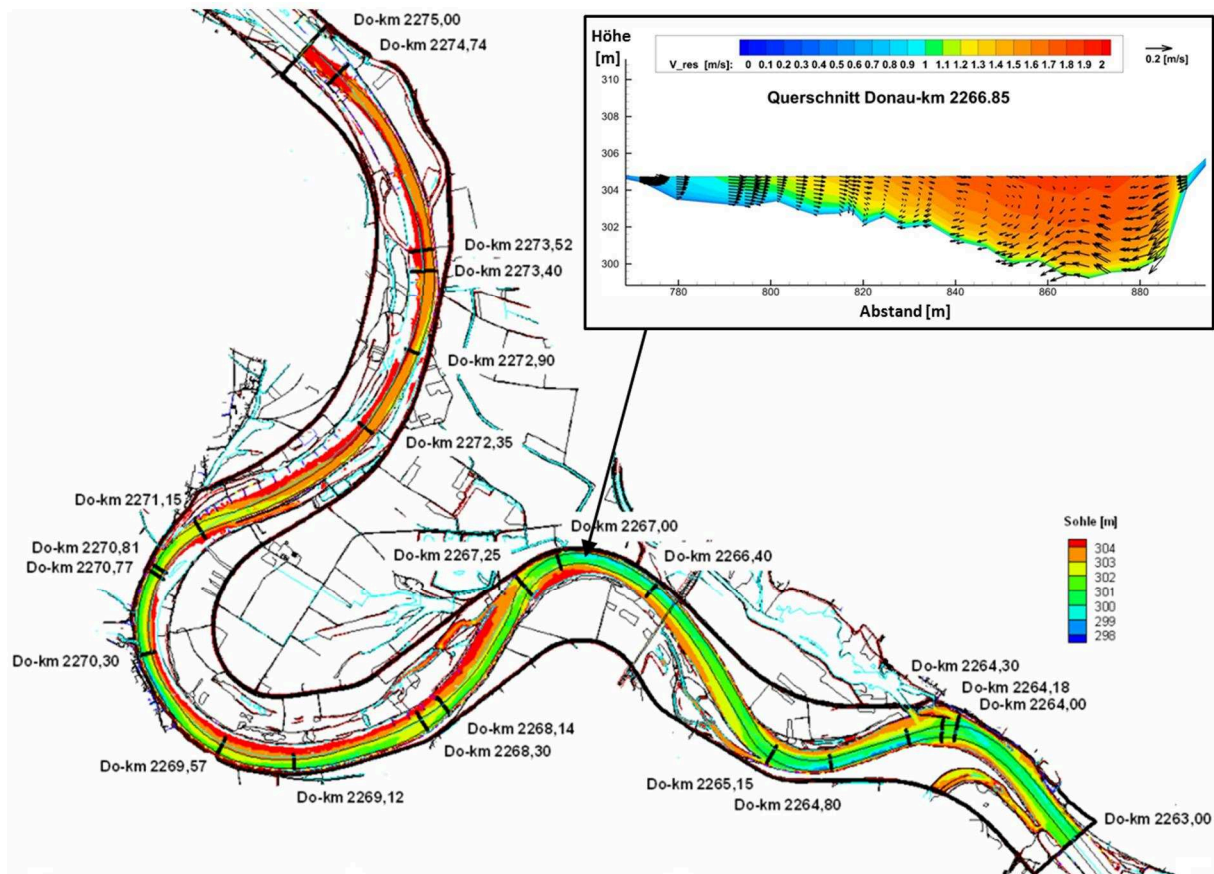


Bild 8: Modellgebiet „Mühlhamer Schleife“ / Sekundärströmung bei km 2266,85

Das Modellgebiet der „Mühlhamer Schleife“ weist eine ausgeprägte Mäanderstruktur auf (Bild 8). Das 12 km lange Modell beginnt ca. 7 km unterhalb der Isarmündung und ist durch die ausgeprägte Flusskrümmung bei Mühlham gekennzeichnet. Dieser Gewässerabschnitt eignet sich daher zur Analyse des Einflusses der Sekundärströmung auf den Geschiebetransport und zur Bewertung des implementierten Sekundärströmungsansatzes. Im Rahmen von 2D-/3D-Modellvergleichen sollten die Einflüsse der Dimensionalität der Strömungsmodellierung auf die Geschiebetransportsimulation und Sohlevolution analysiert werden.

Die Diskretisierung des 3D-HN-Modells in z-Richtung mittels Sigma-Gitter (10 Knoten) führte zu ca. 1.200.000 Berechnungszellen im 3D-Modell, gegenüber 120.000 Zellen im 2D-Modell. Zum Vergleich der morphologischen Ergebnisse des 2D- und 3D-Modells wurde eine Abflussganglinie aus dem Jahr 2001 über eine Simulationsdauer von 365 Tagen angesetzt.

Die Untersuchungen sind ausführlich in IWG (2011) und IWG (2012) dokumentiert.

4.2.7 Rheinmäander im FTM „Neuss-Düsseldorf“

Das FTM „Neuss-Düsseldorf“ (Bild 9) deckt den Bereich von Rhein-km 739,0 bis 749,0 ab und stellt ein Teilmodell des 2D-FTM „Mittlerer Niederrhein“ dar, das sich von Rhein-km 730,0 bis 776,5 erstreckt. Das betrachtete Teilmodell „Neuss-Düsseldorf“ besitzt mit jeweils 500 m langen An- und Auslaufstrecken eine Länge von 11 km und im Falle des 3D-Modells mit 10 Knoten in vertikaler Richtung ca. 820.000 Berechnungszellen. Das Teilmodell wurde für die 2D- und 3D-Untersuchungen ausgewählt, da der ausgeprägte Mäander die stärksten Flusskrümmungen am Niederrhein bildet, und aufgrund der parallel erfolgten Auftragsbearbeitung eine umfassende und hochwertige Naturdatenbasis erarbeitet wurde. Durch den Vergleich mit dem 3D-Modell sollte über die reinen FuE-Aktivitäten hinaus sichergestellt werden, dass die Aussagen aus dem 2D-Modell eine ausreichende Qualität besitzen.

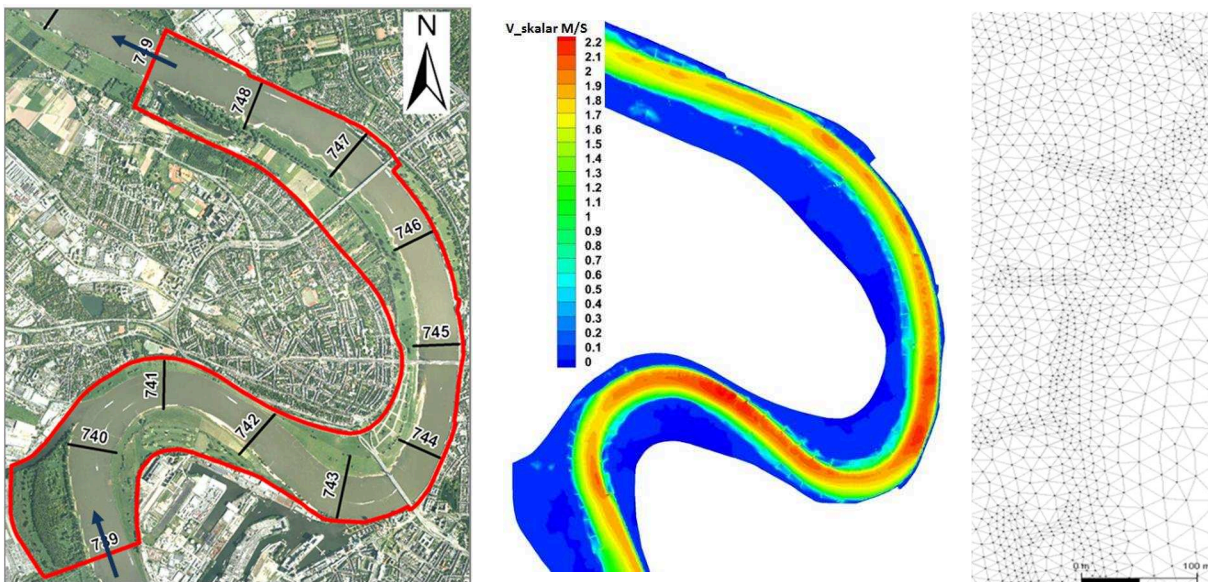


Bild 9: FTM „Neuss-Düsseldorf“: Modellgrenzen, Geschwindigkeiten, Rechengitter

Im Fokus der Untersuchungen standen die zwei- bzw. dreidimensionale Erfassung der Strömung und deren Einfluss auf die morphologische Modellierung. Anhand der hoch auflösenden Messdaten konnten detaillierte Analysen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die natürlichen Verhältnisse durchgeführt werden, indem bei der 2D- und 3D-Modellierung sowohl hydraulische als auch morphologische Berechnungen über unterschiedliche Zeiträume vorgenommen wurden. Die Anfangskornverteilung, die im numerischen Modell gem. Bild 10 in 10 Fraktionen eingeteilt wurde, stellte die Basis für das anschließende Variantenstudium unterschiedlicher morphologischer und hydraulischer Parameter dar. Es wurden stationäre bettbildende Abflüsse von ca. 3000 m³/s bzw. 4000 m³/s und eine natürliche Zweijahresganglinie aus den Jahren 2000 und 2001 simuliert. Anhand einer künstlichen Ganglinie, die sich über 25 Tage erstreckt und einen maximalen Abfluss von ca. 7000 m³/s aufweist, wur-

den u.a. die Ausprägung der Transport-Abfluss-Beziehung und die Auswirkung des morphologischen Faktors infolge der 2D- bzw. 3D-Modellansätze untersucht.

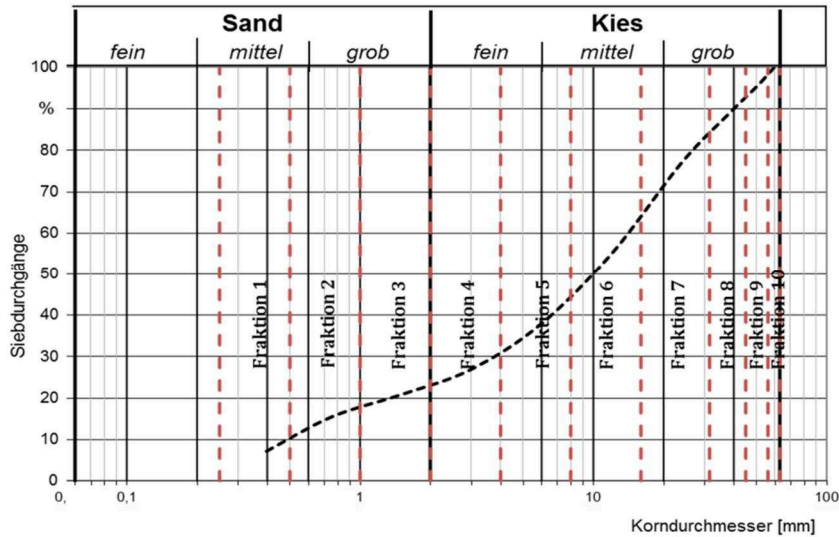


Bild 10: Klassifizierung des Geschiebematerials, 10 Fraktionen

Im Rahmen des Verfahrensvergleichs von TELEMAC-SISYPHE und FAST3D (TU München) anhand des 3D-FTM Neuss-Düsseldorf wurden Unterschiede in den hydraulischen und morphologischen Ergebnissen festgestellt, die einer weiteren Analyse und Bewertung bedürfen.

Die Untersuchungen sind sehr detailliert und umfassend in Backhaus (2013), TUM (2014) sowie IWG (2015a) und IWG (2015b) dokumentiert.

5 Ergebnisse

Auf der Basis von mehrdimensionalen numerischen Modellierungen von Strömungs- und Transportprozessen in Labormodellen bzw. Naturstrecken sollte eine Beurteilung der Möglichkeiten und Grenzen einer 2D-tiefengemittelten im Gegensatz zu einer dreidimensionalen Erfassung der Strömung als Basis morphologischer Modellierungen in Binnenwasserstraßen erfolgen. Die Aufgabenpakete waren inhaltlich an der Auftragsbearbeitung orientiert, so dass neue Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt unmittelbar Eingang in die Projektarbeit finden konnten.

Die fachliche Integration der bestehenden Forschungsk Kooperation mit dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) auf dem Gebiet der numerischen Modellierung in das FuE-Vorhaben hat eine enge Verknüpfung der einzelnen Forschungsarbeiten und u.a. auch eine ausführliche Dokumentation der Untersuchungsergebnisse in den vier Institutsberichten des IWG aus den Jahren 2011, 2012, 2013 und 2015 ermöglicht. Den Abschluss des Forschungsvorhabens bilden ein Validierungsdokument (IWG, 2015b) und eine Dissertation, die derzeit am IWG angefertigt und voraussichtlich in 2016 erscheinen wird.

Die im Folgenden in komprimierter Form dokumentierten Ergebnisse und Erkenntnisse, die nach Schwerpunktthemen geordnet sind, können in chronologischer Reihenfolge den jährlichen Zusammenfassungen in den Forschungskompendien Verkehrswasserbau der BAW der Jahre 2011 bis 2015 entnommen werden.

Sekundärströmung und sohlnahe Geschwindigkeit in 2D- und 3D-Modellen

Im Gegensatz zur 2D-tiefengemittelten Modellierung (mit parametrisiertem Sekundärströmungsansatz) werden im 3D-Modell die für Transportvorgänge maßgebenden sohlnahen Geschwindigkeiten nach Größe und Richtung erfasst und die Entstehung sowie der Zerfall auftretender Sekundärströmungen direkt abgebildet. Aufgrund des hohen Rechenaufwands von 3D-Modellen ist der Einsatz von 2D-tiefengemittelten Modellen für großräumige Fragestellungen an den Binnenwasserstraßen jedoch meistens das probate Mittel.

Die in der BAW überwiegend praktizierte Methode zur Erfassung des Sekundärströmungseinflusses in 2D-Modellen stellt eine einfache Korrektur der Transportrichtung nach Engelund (1974) über eine Winkelabweichung dar, die auf dem Verhältnis von Fließtiefe zum Krümmungsradius basiert. Solche „Winkelabweichungsmodelle“ vernachlässigen den Einfluss der Sekundärströmung auf den Betrag der Sohlschubspannung und werden aufgrund ihrer Einfachheit bevorzugt eingesetzt.

Da die Sekundärströmung erst allmählich im Laufe der Flusskrümmung entsteht und deren Zerfall sich auf einen Nachlaufbereich unterstrom der eigentlichen Krümmung erstreckt, wurde zur Erfassung dieser Prozesse die Berücksichtigung einer Entwicklungslänge im 2D-Modell nach u.a. Hafner (2008) getestet. Hierzu wurde analog zu dem in SISYPHE vorhandenen „loading-law“-Ansatz für das Geschiebetransportvermögen nach Phillips und Sutherland (1989) ein Ansatz nach Kalkwijk und Booij (1986) implementiert, der den effektiven Krümmungsradius über seine Anpassung an die Entwicklungslänge festlegt. In der Validierung des Ansatzes zeigten sich jedoch insbesondere bei der Modellierung von Naturstrecken keine signifikanten Verbesserungen hinsichtlich der Transportsimulation im An- und Nachlaufbereich der Gerinnekrümmungen.

Mittels einer von Tassi und Wang (2014) vorgeschlagenen Methode wurde eine weitere Alternative getestet, die in tiefengemittelten Modellen den Einfluss der Sekundärströmung auf die Fließgeschwindigkeiten und deren Verteilung anhand von Dispersionstermen erfasst. In natürlichen Flussstrecken führte die Berücksichtigung dieser Dispersionsansätze jedoch zu keiner signifikanten Veränderung der Strömungs- und Transportcharakteristik. Vermutlich überprägt der Impuls der Hauptströmung, der in Gerinnekrümmungen den bereits ausgebildeten Sohlprofilen folgt, die Dispersionsterme im 2D-Modell zu sehr. In Anlehnung an Backhaus et al. (2014) sollten daher ihrem Entwicklungsstand entsprechend die neuen Modellansätze anhand von 3D-Testrechnungen überprüft bzw. auf die Streckenspezifika eingestellt werden.

Neben „Wormleaton“ wurde auch die Naturstrecke „Mühlhamer Schleife“ an der Donau analysiert, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse und Erkenntnisse auf natürliche Krümmungsradien und Breiten-Tiefen-Verhältnisse zu überprüfen. Es zeigte sich, dass die Dimensionalität der Strömungsmodellierung zeitlich und räumlich einen signifikanten Einfluss auf die morphologischen Ergebnisse haben kann. Beim Laborversuch von Wormleaton et al. (2005) wies das 3D-Modell insbesondere im Bereich der An- und Nachlaufstrecke der Gerinnekrümmungen eine bessere Übereinstimmung mit den vorhandenen morphologischen Messdaten auf. Diese Erkenntnisse lassen sich qualitativ auch bei der Modellierung der Naturstrecke „Mühlhamer Schleife“ bestätigen (IWG, 2011 und 2012).

Die 2D-3D-Vergleiche im Mäanderabschnitt des FTM „Neuss Düsseldorf“ bestätigten den Einfluss der Dimensionalität der Strömungsmodellierung unter natürlichen Bedingungen. Trotz der nahezu identischen Wasserstände sowie der guten Übereinstimmung hinsichtlich der sich in Gerinnekrümmungen einstellenden Wasserspiegelquerneigungen führt die dreidimensionale Modellierung zu einer deutlich besseren Wiedergabe der Sohlhöhen vor allem im Bereich der Furt. Ergänzende Studien mittels eines Laborversuchs der Universität Innsbruck mit mildereren Krümmungsverhältnissen als bei „Wormleaton“, dafür aber höherer Datendichte und -qualität, führten zu vergleichbaren Ergebnissen (Riesterer et al., 2016).

Generell hat der Vergleich der 2D- und 3D-Modelle gezeigt, dass mit Hilfe der im 2D-tiefengemittelten Modell verwendeten Parametrisierung auch in einem 2D-Modell die Auswirkungen der Sekundärströmungen in Krümmungsbereichen in einem für die Praxis ausreichendem Maße berücksichtigt werden können. Durch die direkte Simulation solcher Effekte und bessere Annäherung an die Natur kann der höhere Rechenaufwand des 3D-Modells jedoch von Fall zu Fall gerechtfertigt sein. Daher sollten insbesondere in Flussabschnitten mit starken Krümmungen beide Modellansätze betrieben werden. Auf diese Weise können die Ergebnisse des 2D-Modells überprüft und auf die Streckenspezifika eingestellt werden (Backhaus et al., 2014).

Da die dreidimensionalen Prozesse in den an Bundeswasserstraßen vorherrschenden Breiten-/Tiefenverhältnissen bei mesoskaligen Betrachtungen über längere Zeiträume eine untergeordnete Rolle spielen, liegen die Unsicherheiten in der Modellierung weniger in der Wahl von 2D- oder 3D-Modellansätzen. Sie liegen vielmehr auf Seiten der morphologischen Modellierung und deren Abhängigkeit von stochastischen Einflüssen, die durch die natürlichen Schwankungen in der Hydrologie und deren langzeitlichen Ausprägungen auf die bettbildenden Prozesse gegeben sind. Da diese Einflüsse die Aussagen der folgenden, mehr oder weniger deterministischen Konzepte und daraus abgeleiteten Parameter überprägen, ist die Übertragbarkeit von Labor- auf Naturuntersuchungen und von Erfahrungen aus einem Modell auf ein anderes Modell nur sehr eingeschränkt möglich.

Sohlschubspannungsansätze

In der Veröffentlichung von Biron et al. (2004) werden verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Sohlschubspannung aus in einer Laborrinne mit beidseitiger Einengung gemessenen Geschwindigkeitsprofilen verglichen. Neben den Ansätzen, die von einer logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung senkrecht zur Strömungsberandung ausgehen und sich prinzipiell auch für tiefengemittelte Modelle eignen, wurden auch Ansätze untersucht, die auf den turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen (TKE) beruhen. Anhand ihrer Ergebnisse wird deutlich, dass in markanten Bereichen sowohl die Absolutwerte, wie auch die Schwingungsspektren zwischen den einzelnen Ansätzen grob um bis zu einem Faktor 2 differieren.

Da die Sohlschubspannung in den oftmals verwendeten „Schwellenwertformeln“ des Geschiebetransports unmittelbar den Bewegungsbeginn und die Transportmenge beeinflusst, wurden Grundfunktionalitäten des logarithmischen Geschwindigkeitsansatzes in 2D- und 3D-Modellen an den Gegebenheiten der Wasserstraßen in TELEMAC-2D und TELEMAC-3D und deren Kopplung an SISYPHE untersucht. Die Laborversuche der BAW in einer geraden Rinne mit hochauflösenden Geschwindigkeitsmessungen bis nahe an die Sohle dienten u.a. der Evaluierung der in den numerischen Verfahren zur Berechnung der Sohlschubspannung eingesetzten Wandfunktionen. Im Vergleich der dreidimensionalen HN-Verfahren TELEMAC-3D, Flow3D, CFX, OpenFoam und Delft3D ergab sich bzgl. der sich einstellenden Ge-

schwindigkeitsprofile eine qualitativ gute Übereinstimmung der numerischen Ergebnisse untereinander sowie mit den vorhandenen Labormessdaten (IWG, 2012).

Am Beispiel der BAW-Laborstudie mit seitlicher Einschnürung wurden in einem TELEMAC-3D-Modell die Sohl Schubspannungsverteilungen aus der Anwendung der Nikuradse-Formel und einem TKE-Ansatz nach Harsha und Lee (1970) gegenübergestellt. Dabei wurden über einen Großteil des Untersuchungsgebiets nahezu identische Sohl Schubspannungen festgestellt. Lediglich unmittelbar im Bereich der Einengung waren geringe Differenzen ($< 5\%$) zu verzeichnen (IWG, 2015a).

Dreidimensionale und quasi-dreidimensionale Modelle

Aufgrund der in TELEMAC-3D vereinfachenden Annahmen bei der Lösung der dreidimensionalen Strömungsgleichungen, die überwiegend auf der Vorgabe einer hydrostatischen Druckverteilung beruhen, wurden mittels eines sogenannten „Voll-3D-Verfahrens“ hydraulische Vergleichsrechnungen in unterschiedlichen Laborgerinnen (gerade BAW-Rinne, Wormleaton et al., 2005), Yen-Krümmen (Yen und Lee, 1995) durchgeführt. Zum Vergleich wurde das Verfahren „SSIIM“ der Universität Trondheim eingesetzt. Die Strömungssimulationen zeigten generell eine gute Übereinstimmung zwischen beiden Verfahren. Trotz der in TELEMAC-3D vorhandenen Vereinfachungen (hydrostatische Druckverteilung) wurden die in Gerinnekrümmungen auftretenden Sekundärströmungen bei beiden Modellverfahren sowohl hinsichtlich ihres Verlaufs als auch in ihrer Intensität ähnlich gut erfasst.

Der Modellvergleich zwischen TELEMAC-SISYPHE und FAST3D, der am Beispiel der Rheinstrecke „Neuss-Düsseldorf“ (Rhein-km 739,0 – 749,0) vorgenommen wurde, zeigte im Wasserspiegelverlauf und in den Strömungsgeschwindigkeiten generell eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Verfahren (TUM, 2014). Dass die Sohl Schubspannungen im FAST3D-Modell generell um ca. 20 – 30% höher lagen, konnte bisher aus organisatorischen Gründen nicht geklärt werden. Vermutlich sind die systematischen Abweichungen auf unterschiedliche Interpretationen des Widerstandsgesetzes nach Nikuradse (1933) zurückzuführen.

Die Ergebnisse zu den morphologischen Vergleichsrechnungen, die in einer ersten Betrachtung teilweise wesentliche Differenzen aufwiesen, wurden einer weiteren Überprüfung unterzogen. Dabei wurde festgestellt, dass die Anfangsbedingung für die Kornverteilungen in der Sohle des FAST3D-Modells als konstant angenommen wurden, im TELEMAC-Modell jedoch aufgrund einer morphologischen Initialisierung variabel vorlagen. Da diese Anfangsbedingungen im FAST3D-Modell nicht entsprechend gesetzt waren und seitens TUM keine weiteren Berechnungen durchgeführt wurden, waren bisher keine belastbaren Aussagen zum morphologischen Vergleich zwischen beiden Verfahren möglich. Diese sollten jedoch überprüft und einer weitergehenden Analyse unterzogen werden.

Formeln zum fraktionierten Geschiebetransport

In einem weiteren Arbeitsschritt wurde in das Morphologiemodul SISYPHE ein neuer Geschiebetransportansatz für den fraktionierten Transport unter Berücksichtigung der Hiding- und Exposure-Effekte nach Wu et al. (2000) implementiert, dem in der aktuellen Literatur das breiteste Anwendungsspektrum attestiert wird. Erste Anwendungen bei der mehrdimensionalen Modellbetrachtung von Laborgerinnen lieferten plausible Ergebnisse, so dass ein weiterer Test des Ansatzes nach Wu unter realen Randbedingungen anhand des 2D-Modells „Mittlerer Niederrhein“ (Rhein-km 730,0 – 776,5) anzustreben ist.

6 Empfehlungen und Ausblick

Es ist leicht einsehbar, dass die dreidimensionalen Prozesse in den an Bundeswasserstraßen vorherrschenden Breiten-/Tiefenverhältnissen bei mesoskaligen Betrachtungen über längere Zeiträume eine untergeordnete Rolle spielen. In den 2D-tiefengemittelten Modellen sind es nicht die Strömungseigenschaften, die zu ungenau abgebildet werden. Die Unsicherheiten liegen daher weniger in der Wahl von 2D- oder 3D-Modellansätzen. Sie liegen vielmehr auf Seiten der morphologischen Modellierung und deren Abhängigkeit von stochastischen Einflüssen, die durch die natürlichen Schwankungen in der Hydrologie und deren langzeitlichen Ausprägungen auf die bettbildenden Prozesse gegeben sind.

Generell musste festgestellt werden, dass die fraktionierte Transportmodellierung einen sehr hohen Modellierungsaufwand erzeugt, ohne ausreichend Klarheit bezüglich einer Aussage zur Prognosefähigkeit der untersuchten Ansätze zu schaffen. Schon die initiale Festlegung der Fraktionen bei der Diskretisierung eines repräsentativen Körnungsbandes übt einen entscheidenden Einfluss auf die komplexen Interaktionen zwischen Strömung, Feststofftransport und bettbildenden Prozessen aus. Das fraktionierte Transportmodell mit seiner Vielzahl von Parametern und Freiheitsgraden stellt für den Anwender vor allem bei instationären Abflüssen ein sehr komplexes Modellierungswerkzeug dar, dessen Verhalten schwer einzuschätzen ist.

Solange diese Unsicherheiten der fraktionierten Transportmodellierung mit der daran gekoppelten Berechnung der Sohlevolution bestehen, lassen sich in puncto Prognosefähigkeit keine quantifizierbaren Aussagen gewinnen, die eine gewisse Allgemeingültigkeit oder Übertragbarkeit besitzen. In der Interaktion mit weiteren unscharfen Parametern wie der Erfassung des Bewegungsbeginns, der ebenfalls stochastischer Natur ist, lassen sich die im numerischen Modell ablaufenden Prozesse nur schwer interpretieren.

Die noch offenen Fragen und bestehenden Unsicherheiten lassen daher auf die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen schließen. Da sich die o.g. Untersuchungen weitgehend auf deterministische Methoden beschränkten, sollten in einem künftigen FuE-Projekt primär stochastische Methoden betrachtet und aktuelle Ansätze wie z.B. der von Tsai und Lai (2014) bis hin zu einem Ansatz mit künstlichen neuronalen Netzen (ANN) von Bui et al. (2015) hinsichtlich ihrer Eignung für Problemstellungen an Bundeswasserstraßen getestet werden. Der potentielle Vorteil dieser neuen Methoden liegt in einem gegenüber fraktionierter FTM deutlich reduzierten Modellierungsaufwand. Sofern einem dieser Ansätze zumindest gleichwertige Prognosefähigkeiten attestiert werden können, stellt er eine ressourcensparende Alternative zur Lösung praktischer Problemstellungen dar.

7 Literatur

Backhaus, L. (2013): Vergleich morphodynamischer Prognosen des Feststofftransportmodells Neuss-Düsseldorf in Abhängigkeit von 2D- und 3D-Strömungsansätzen mit dem Verfahren TELEMAC/SISYPHE. Diplomarbeit, BAW, Referat Numerische Verfahren im Wasserbau / KIT, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Juli 2013.

Backhaus, L.; Brudy-Zippelius, T.; Wenka, T.; Riesterer, J. (2014): Comparison of Morphological Predictions in the Lower Rhine River by Means of a 2-D and 3-D Model and in situ Measurements. River Flow 2014, Intern. Conf. on Fluvial Hydraulics, Lausanne

BAW (2009): Bericht zum FuE-Projekt 8167, Morphologische Versuche in einer Rinne mit Einschnürung - Mittel- bis Feinkiessohle, März 2009

BAW (2010): Fachkonzept der PG Mehrdimensionale Feststofftransportmodellierung, V. 1.0

Biron, P.M.; Robson, C.; Lapointe, M.F.; Gaskin, S.J. (2004): Comparing different methods of bed shear stress estimates in simple and complex flow fields. Earth Surface Processes and Landforms, 29 (11), pp.1403-1415

Bui M.D.; Kaveh, K.; Rutschmann, P. (2015): Integrating artificial networks into hydromorphological model for fluvial channels. Proc. 36th IAHR World Congress 2015, Den Haag

Engelund, F. (1974): Flow and Bed Topography in Channel Bends. ASCE J. Hydr. Div., Vol. 100, No. 11

Feurich, R. (2002): Untersuchung der Strömungsverhältnisse in einem doppelt gekrümmten Gerinne. Dissertation, Institut für Wasserbau, Universität Innsbruck

Feurich, R.; Olsen N.R.B. (2011): Three-Dimensional Modeling of Nonuniform Sediment Transport in an S-Shaped Channel. J. Hydr. Eng., Vol. 137, No. 4, pp. 493-495

Harsha, P.T.; Lee, S.C. (1970): Correlation between Turbulent Shear Stress and Turbulent Kinetic Energy. AIAA Journal, Vol. 8, No. 8, pp. 1508-1510

IWG (2011): 1. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung (01. – 12.2010). KIT, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, März 2011

IWG (2012): 2. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung (04. – 12.2011). KIT, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Feb. 2012

IWG (2013): 3. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung, SSIIM Verfahrensvergleich. KIT, Inst. f. Wasser u. Gewässerentw., März 2013

IWG (2015a): 4. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung, Endbericht. KIT, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Mai 2015

IWG (2015b): Bericht Validierungsfall Niederrheinmäander. KIT, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, November 2015

Kalkwijk, J.P.T.; R. Booij (1986): Adaptation of secondary flow in a nearly-horizontal flow, IAHR, Journ. Hydr. Res., Vol. 24, No.1, pp. 19-37

Meyer-Peter, E.; Müller, R. (1949): Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebs. Schweizerische Bauzeitung, 67(3), S. 29-32

Nezu, I.; Nakagawa, H. (1993): Turbulence in Open Channel Flows, IAHR Monograph Series, A.A. Balkema, Rotterdam

Nikuradse, J. (1933): Strömungsgesetze in rauhen Röhren. In Forschungsheft Bd. 361, VDI-Verlag Düsseldorf, S 1-22

Phillips, B.C.; Sutherland, A.J. (1989): Spatial lag effects in bed load sediment transport. IAHR, Journ. Hydr. Res., Vol. 27, No.1, pp. 115-133

Riesterer, J.; Brudy-Zippelius, T.; Wenka, T.; Nestmann, F. (2016): Multidimensional Bed Load Transport Modelling of a Secondary Flow influenced Curved Channel. (Zur Veröffentlichung im IAHR Journal of Applied Water Engineering and Research eingereicht)

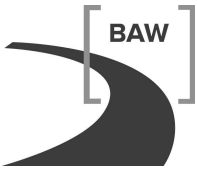
Rodi, W. (1984): Turbulence Models and their Application in Hydraulics, IAHR Monograph, 2nd Revised Edition, Delft

Tassi, P.; Wang, D. (2014): Secondary Flow Corrections into the TELEMAC-MASCARET Modelling System, Proc. of 21st TELEMAC - MASCARET User Club, Grenoble, France, 15-17 October, 2014

Tsai, C.W.; Lai, K.-C. (2014): Three-State Continuous-Time Markov Chain Model for Mixed-Size Sediment Particle Transport. ASCE Journ Hydr. Eng., publ. online 2014-06-23

TUM (2011): Literaturstudie „Alternative Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransports in Fließgewässern“. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München

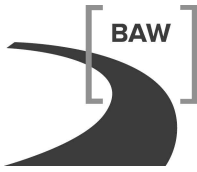
TUM (2014): Validierung dreidimensionaler Feststofftransportmodelle für Fragestellungen an den Bundeswasserstraßen. Bericht, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München, Juli 2014



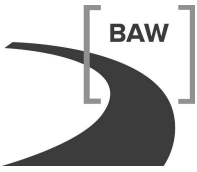
Wormleaton, P.R.; Hey, R.D.; Sellin, R.H.J.; Bryant, T.; Loveless, J.; Catmur, S.E. (2005): Behaviour of Meandering Overbank Channels with Graded Sand Beds. J. Hydr. Eng., Vol. 131, No. 8, pp. 665-681

Wu, W.; Wang, S; Jia, Y. (2000): Non-uniform sediment transport in alluvial rivers. Journal of Hydraulic Research, Vol. 38, No. 6

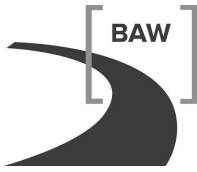
Yen, C.L.; Lee, K.T. (1995): Bed Topography and Sediment Sorting in Channel Bend with Unsteady Flow, ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.121, No.8



< Anlagen >



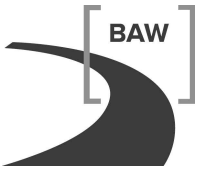
< leere Seite >



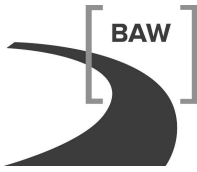
Anlage 1

**1. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der
TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung (01.
– 12.2010). KIT, Institut für Wasser und Gewässer-
entwicklung, März 2011.**

Dipl.-Ing. Jochen Riesterer



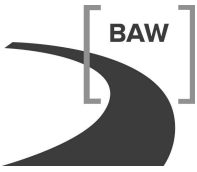
< leere Seite >



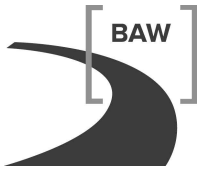
Anlage 2

**2. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der
TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung (04.
– 12.2011). KIT, Institut für Wasser und Gewässer-
entwicklung, Februar 2012.**

Dipl.-Ing. Jochen Riesterer



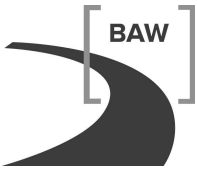
< leere Seite >



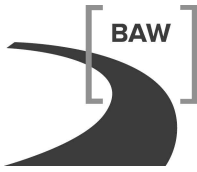
Anlage 3

3. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung, SSIIM Verfahrensvergleich. KIT, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, März 2013.

Dipl.-Ing. Jochen Riesterer



< leere Seite >

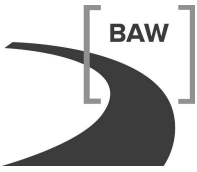


Anlage 4

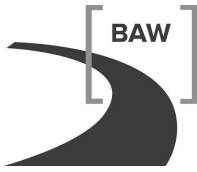
**Vergleich morphodynamischer Prognosen des
FTMs Neuss-Düsseldorf in Abhängigkeit von
2D- und 3D-Strömungsansätzen mit dem Ver-
fahren TELEMAC/SISYPHE.**

**Diplomarbeit, BAW, Referat Numerische Ver-
fahren im Wasserbau / KIT, Institut für Wasser
und Gewässerentwicklung, Juli 2013.**

cand. ing. Lars Backhaus



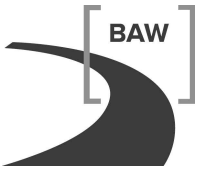
< leere Seite >



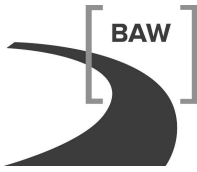
Anlage 5

Validierung dreidimensionaler Feststofftransportmodelle für Fragestellungen an den Bundeswasserstraßen. Bericht, TUM, Institut für Wasser und Umwelt, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Juli 2014.

Dr. Anna Kuhlmann, Dr. Minh Duc Bui



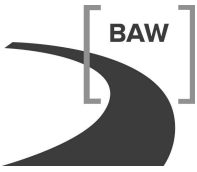
< leere Seite >



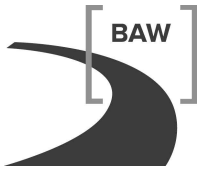
Anlage 6

4. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung, Endbericht. KIT, Institut für Wasser und Ge- wässerentwicklung, Dezember 2014.

Dipl.-Ing. Jochen Riesterer



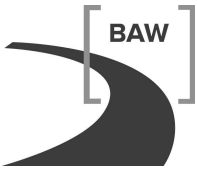
< leere Seite >



Anlage 7

Bericht Validierungsfall Niederrheinmäander, November 2015.

Dipl.-Ing. Jochen Riesterer



< leere Seite >