

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Kopmann, Rebekka

Untersuchung der Prognosefähigkeit von mehrdimensionalen Feststofftransportmodellen an spezifischen Fragestellungen aus dem Flussbau. FuE- Abschlussbericht A39530110064

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106991>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

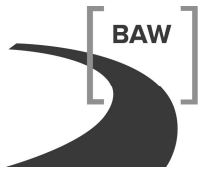
Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2015): Untersuchung der Prognosefähigkeit von mehrdimensionalen Feststofftransportmodellen an spezifischen Fragestellungen aus dem Flussbau. FuE-Abschlussbericht A39530110064. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

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.

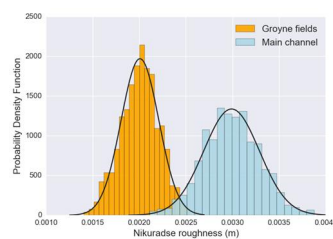
Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten



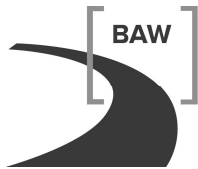
FuE-Abschlussbericht

Untersuchung der Prognosefähigkeit von mehrdimensionalen Feststofftransport- modellen an spezifischen Fragestellungen aus dem Flussbau

A39530110064



Dezember 2015



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

FuE-Abschlussbericht
Untersuchung der Prognosefähigkeit von mehrdimen-
sionalen Feststofftransportmo-
dellen an spezifischen
Fragestellungen aus dem Flussbau

Beginn des Vorhabens: Januar 2002

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A39530110064

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau
 Referat: W5
 Projektleiter Rebekka Kopmann
 Bearbeiter: Rebekka Kopmann

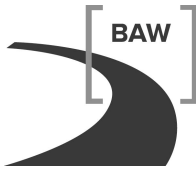
Karlsruhe, Dezember 2015

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



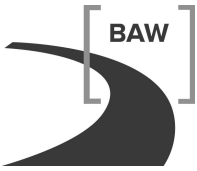
Zusammenfassung

Bei vielen durch die BAW durchgeführten Untersuchungen zur Wirkungsweise flussbaulicher Maßnahmen muss die morphodynamische Flussentwicklung einbezogen werden. Darüber hinaus ist eine mehrdimensionale räumliche Betrachtung der Phänomene auf Grund des komplexen Zusammenspiels zwischen Hydrodynamik und Morphodynamik oft unabdingbar. Gegenüber gegenständlichen Modellen mit beweglicher Sohle bieten mehrdimensionale numerische Feststofftransportmodelle (FT-Modelle) den Vorteil eines geringeren Aufwandes. Ziel des Projektes war es, die Eignung mehrdimensionaler numerischer FT-Modelle zur Abbildung grundlegender morphologischer Prozesse anhand von Messungen aus Labormodellen zu beurteilen. Daraus entstanden Weiterentwicklungen der in der BAW vorhandenen FT-Programme sowie eine beschleunigte Einführung der mehrdimensionalen FT-Modelle im Rahmen der Projektarbeit.

Der Einsatz von prognosesicheren, auf die Fragestellungen der WSV zugeschnittenen FT-Modelle sichert die effiziente und qualitativ hochwertige Bearbeitung von Projekten mit morphodynamischen Fragestellungen. Gerade bei Langzeitprognosen für morphologischen Fragestellungen, die eine erhebliche Unschärfe aufgrund der langen Vorhersagezeiträume und der komplexen Prozesse aufweisen, sind Szenarienrechnungen sehr hilfreich und tragen zur Verbesserung der Bewertung von Maßnahmen und deren Qualitätskontrolle bei. Als Ergänzung zu Naturuntersuchungen und gegenständlichen Modellen sind mehrdimensionale FT-Modelle optimal geeignet, die räumliche und zeitliche Wirkung vieler verschiedener Einflussgrößen mittels Szenarienrechnungen aufzuzeigen.

Während der 13-jährigen Laufzeit des FuE-Projektes wurden drei Untersuchungsschwerpunkte verfolgt. An Rinnenversuchen mit beweglicher Sohle wurden speziell abgestimmte Datensätze erzeugt, um FT-Programme besser validieren zu können. Durch den zeitgleichen Einsatz des gegenständlichen und des numerischen Modells stehen nun auch für andere Wissenschaftler hervorragende Datensätze zur Validierung zur Verfügung. Die in der BAW vorhandenen FT-Programme wurden mit diesen Messdaten validiert. Darüber hinaus kamen auch geeignete Messdaten aus der Literatur zum Einsatz. So konnten die Anwendbarkeit und Grenzen der Modelle für typische Fragestellungen an Bundeswasserstraßen abgeleitet werden.

Ein erheblicher Teil der Arbeit in diesem Forschungsprojekt ging in die Untersuchung und Anwendung von Zuverlässigkeitsmethoden. Es wurden verschiedene Methoden untersucht und sowohl an Rinnenmodellen als auch an Projektbeispielen angewendet. Es stehen nun ein theoretisches Gerüst, praktische Vorgehensweisen sowie Software zur Verfügung, um Aussagen zu Sensitivitäten von Eingangsparametern und den zugehörigen Konfidenzintervallen und Prognosewahrscheinlichkeiten zu treffen. Darüber hinaus gab es erste Versuche



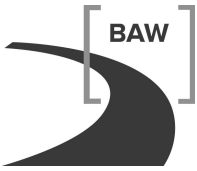
zur automatischen Kalibrierung, die aber vor einer praktischen Verwendung in der Projektarbeit noch weitere Untersuchungen benötigen.

Die in der BAW bestehenden FT-Programme wurden in Zusammenarbeit mit Universitäten und Ingenieurbüros weiterentwickelt. Es wurde ein Sekundärströmungsansatz implementiert, der die Ausbildung eines typischen Krümmungsprofils auch in tiefengemittelten Strömungssimulationen ermöglicht. Der Einfluss der Turbulenz auf den Geschiebetransport wurde detailliert untersucht, wobei eine Einbeziehung der Turbulenz in die Schubspannungsberechnung in einem anderen BAW-Forschungsprojekt realisiert werden konnte. Für die bessere Abbildung des Sohlaufbaus wurde ein neues Schichtmodell implementiert, das inzwischen Eingang in die offizielle quelloffene Version der Telemac-Software gefunden hat. Die Anwendbarkeit auf zwei Projektgebiete am Rhein wird außerhalb des Projektes noch geprüft.

Die mehrdimensionale FT-Modellierung gehört noch nicht zum Stand der Technik. So ist es nicht verwunderlich, dass die Untersuchung der Prognosefähigkeit trotz der langen Laufzeit des Projektes nicht als abgeschlossen bezeichnet werden kann. Vielmehr ist die Weiterentwicklung der FT-Programme sowie ihre ständige Validierung eine Daueraufgabe der Wissenschaft und sollte auch in der BAW weiterhin betrieben werden.

(1) Titel		FuE-Abschlussbericht Untersuchung der Prognosefähigkeit von mehrdimensionalen Feststofftransportmodellen an spezifischen Fragestellungen aus dem Flussbau	
(2) Ort	(3) Wasserstr.-Nr.	(4) Kilometer von _____ bis _____	
(5) Projektleiter	Rebekka Kopmann		
(6) Bearbeiter	Rebekka Kopmann		
(7) Mitarbeiter			
(8) Auftrags-Nr.	A39530110064		
(9) Auftragsdatum	01.01.2002	(10) aufgestellt am	
(11) Seitenzahl	(12) Sonderhinweise		
(13) Kurzfassung			
<p>Bei vielen durch die BAW durchgeführten Untersuchungen zur Wirkungsweise flussbaulicher Maßnahmen muss die morphodynamische Flussentwicklung einbezogen werden. Darüber hinaus ist eine mehrdimensionale räumliche Betrachtung der Phänomene auf Grund des komplexen Zusammenspiels zwischen Hydrodynamik und Morphodynamik oft unabdingbar. Ziel des Projektes war es, die Eignung numerischer mehrdimensionaler Feststofftransport-Modelle (FT-Modelle) zur Abbildung grundlegender morphologischer Prozesse anhand von Messungen aus Labormodellen zu beurteilen. Daraus entstanden Weiterentwicklungen der in der BAW vorhandenen FT-Programme sowie eine beschleunigte Einführung der mehrdimensionalen FT-Modelle im Rahmen der Projektarbeit. Der Einsatz von prognosesicheren, auf die Fragestellungen der WSV zugeschnittenen FT-Modelle sichert die effiziente und qualitativ hochwertige Bearbeitung von Projekten mit morphodynamischen Fragestellungen.</p> <p>Es wurden drei Untersuchungsschwerpunkte verfolgt. Die Anwendbarkeit und Grenzen der FT-Programme in der BAW wurden anhand an Rinnenmodellen der BAW erzeugten Validierungsmessdatensätzen und anhand geeigneter Datensätze aus der Literatur für typische Fragestellungen an Bundeswasserstraßen abgeleitet.</p> <p>Zudem wurden verschiedene Zuverlässigkeitsmethoden untersucht und sowohl an Rinnenmodellen als auch an Projektbeispielen angewendet. Es steht nun ein theoretisches Gerüst und praktische Vorgehensweisen sowie Software zur Verfügung, um Aussagen zu Sensitivitäten von Eingangsparametern und den zugehörigen Konfidenzintervallen und Prognosewahrscheinlichkeiten zu treffen.</p> <p>Die in der BAW bestehenden FT-Programme wurden in Zusammenarbeit mit Universitäten und Ingenieurbüros um einen Sekundärströmungsansatz, eine bessere Berücksichtigung der Turbulenz auf den Geschiebetransport und um ein neues vertikales Schichtmodell erweitert.</p>			
(14) Standort	(15) Archiv-Nr.		

Inhaltsverzeichnis	Seite	
1	Problemstellung und Ziel	1
1.1	Ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen und Stand des Wissens	1
1.2	Bedeutung für die WSV	1
1.3	Untersuchungsziel	2
2	Ergebnisse	2
2.1	Untersuchungen an Labormodellen	2
2.1.1	Einschnürungsrinne	3
2.1.2	Dünenuntersuchungen an einer morphologischen Systemrinne (blaue Rinne)	6
2.1.3	Buhnenuntersuchungen an einer langen Rinne (grüne Rinne)	7
2.2	Validierung bestehender FT-Programme	8
2.2.1	Validierung des Einflusses von Krümmungen	9
2.2.2	Validierung von Transportkörpern	9
2.2.3	Validierung von Sohlaufbau	10
2.2.4	Validierung von Bauwerken	10
2.2.5	Validierung außerhalb der Flussrinne	11
2.2.6	Langzeitmodellierung	12
2.2.7	Bewertung der Validierungen	13
2.3	Einschätzung der erreichten Genauigkeit mit Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung	14
2.3.1	Beschreibung der Zuverlässigkeitsmethoden	15
2.3.1.1	Zuverlässigkeitsmethode 1. Ordnung	15
2.3.1.2	Monte-Carlo Methode	19
2.3.1.3	Metamodellierung	19
2.3.2	Vergleich der Zuverlässigkeitsmethoden und Beispielanwendungen	20
2.4	Weiterentwicklung bestehender FT-Programme	24
2.4.1	Berücksichtigung von turbulenzinduziertem Geschiebetransport	24
2.4.2	Entwicklung eines neuen Mehrschichtmodells	26
2.4.3	Weiterentwicklung des Sekundärströmungsansatzes	27
3	Empfehlungen und Ausblick	28
4	Publikationen	30
5	Literatur	32



Bildverzeichnis

Seite

Es konnten keine Einträge für ein Abbildungsverzeichnis gefunden werden.

Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 1: Übersicht der Kies-Versuche	5
Tabelle 2: Übersicht der Sand-Versuche	5
Tabelle 3: Übersicht der Anwendungen der Zuverlässigkeitsmethoden	22

Anlagenverzeichnis

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen und Stand des Wissens

Bei den durch die BAW durchgeführten Untersuchungen zur Wirkungsweise flussbaulicher Maßnahmen muss zunehmend die morphodynamische Flussentwicklung einbezogen werden. Mehrdimensionale numerische Feststofftransport-Modelle (FT-Modelle) werden immer häufiger zur Lösung von instationären, großskaligen Problemen eingesetzt, da sie bereits einen beachtlichen Entwicklungsstand erreicht haben. Allerdings setzt eine erfolgreiche Anwendung dieser Verfahren ein grundlegendes Verständnis der physikalischen Phänomene sowie große Erfahrung in der numerischen Modellierung voraus. Dies ist bedingt durch die Vielfalt und enorme Komplexität der morphodynamischen Phänomene (insbesondere durch Rückkopplungsprozesse zwischen Strömung und sich umlagernder Sohle) und durch deren phänomenspezifische Beschreibung mittels semi-empirischer Gleichungen.

Während die Überprüfung von rein hydrodynamischen Modellsystemen an analytischen Lösungen durchgeführt werden kann, fehlen diese für komplexere morphodynamische Prozesse. Die Zuverlässigkeit dieser Modellklasse ist daher an die Verifikation und Validierung durch Fallstudien und an die Erfahrung des Programmentwicklers und -anwenders gebunden. Verifikation, Validierung und Kalibrierung der Modelle müssen daher sehr sorgfältig und ausführlich durchgeführt werden. Für die BAW ist der Nachweis der Anwendbarkeit und der Grenzen für die praxisrelevanten Fragestellungen zu erbringen. Zentral ist dabei die Frage, mit welcher Sicherheit FT-Modelle bei welchen Fragestellungen zur Prognose von Sohlentwicklungen eingesetzt werden können.

1.2 Bedeutung für die WSV

Der Einsatz von prognosesicheren, auf die Fragestellungen der WSV zugeschnittenen FT-Modelle sichert die effiziente und qualitativ hochwertige Bearbeitung von Projekten mit morphodynamischen Fragestellungen. Als Ergänzung zu Naturuntersuchungen, gegenständlichen und numerischen eindimensionalen Modellen ist dieses Werkzeug optimal geeignet, die räumliche und zeitliche Wirkung vieler verschiedener Einflussgrößen mittels Szenarienrechnungen aufzuzeigen. Gerade bei Langzeitprognosen von morphologischen Fragestellungen, die eine erhebliche Unschärfe aufgrund der langen Vorhersagezeiträume und der komplexen Prozesse aufweisen, sind Szenarienrechnungen sehr hilfreich und tragen zur Verbesserung der Bewertung von Maßnahmen und deren Qualitätskontrolle bei.

1.3 Untersuchungsziel

Ziel des Projektes war es, die Eignung numerischer FT-Modelle zur Abbildung grundlegender morphologischer Prozesse zu beurteilen. Dies geschah anhand von Messungen aus Labormodellen, da bei diesen bessere Messgenauigkeiten erzielt werden können als bei Naturmessungen und weil die Experimente auf die Isolierung einzelner morphodynamischer Phänomene zugeschnitten werden können. Als Ergebnis dieses Projektes sind Weiterentwicklungen der vorhandenen FT-Modelle sowie eine beschleunigte Einführung derselben im Rahmen der Projektarbeit entstanden. Es wurden folgende Untersuchungsschwerpunkte verfolgt:

- Untersuchungen an Labormodellen mit beweglicher Sohle für die Herstellung von geeigneten Messdatensätzen, speziell zugeschnitten auf die Validierung von FT-Modellen.
- Validierung bestehender FT-Programme anhand geeigneter Messdatensätze mit dem Ziel, die Anwendbarkeit und Grenzen der Modelle aufzuzeigen.
- Einschätzung der erreichten Prognosefähigkeit mit Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung.
- Weiterentwicklung bestehender FT-Programme in Zusammenarbeit mit Universitäten und Ingenieurbüros.

2 Ergebnisse

Während der 13-jährigen Laufzeit des Projektes wurden die oben beschriebenen Untersuchungsschwerpunkte nicht nacheinander, sondern alternierend bearbeitet. Die Präsentation der Ergebnisse gliedert sich daher thematisch und nicht chronologisch in diese Schwerpunkte. Es wurden zwei FT-Programme, das Modul Sisyphe des Programmsystems Telemac (www.opentelemac.org) sowie das Programm SediMorph (wiki.baw.de/methoden/index.php5/Mathematisches_Verfahren_SEDIMORPH) untersucht, die beide in der BAW mitentwickelt werden und zum Einsatz kommen. Beide Module Sisyphe und SediMorph wurden mit dem tiefengemittelten Hydrodynamik Modul Telemac-2D (ebenfalls aus dem Programmsystem Telemac) gekoppelt. Während der Projektlaufzeit hat sich gezeigt, dass die Kopplung SediMorph und Telemac2D nicht zufriedenstellend realisiert wurde. Diese Kopplung wurde nicht weiter verfolgt, so dass seit 2007 in dem Projekt nur noch mit dem Programmsystem Telemac/Sisyphe gearbeitet wurde.

2.1 Untersuchungen an Labormodellen

Anhand einer Literaturrecherche (Schankat, Wieprecht, 2006) zu Messdaten an Labormodellen, die sich zur Validierung von numerischen Feststofftransportmodellen eignen, wurde festgestellt, dass zwar eine Vielzahl Labormodelle und deren Messergebnisse in der Literatur

beschrieben wurden, diese sich aber mitnichten immer oder auch nur zu einem großen Teil zur Validierung von numerischen Feststofftransportmodellen eignen. Da Messungen sehr aufwändig sind, wurden manchmal wesentliche Parameter nicht oder nur in unzureichender Qualität gemessen oder auch einfach nicht publiziert. Die nachträgliche Beschaffung von Messdaten oder von klärenden Informationen zu bestimmten aufgefallenen Inkonsistenzen an den Institutionen der Messeinrichtung stellte sich als oft nicht möglich heraus. Darüber hinaus hat sich die Messtechnik in den letzten zehn Jahren enorm weiterentwickelt. Flächige, hochauflösende Messungen von Geschwindigkeitsprofilen und Sohländerungen sind inzwischen möglich und bieten damit deutlich verbesserte Validierungsmöglichkeiten verglichen mit alten publizierten Messdaten. Aus diesen Gründen wurden neue Rinnenversuche zu bestimmten projektrelevanten Phänomenen konzipiert, die dezidiert die Validierung von numerischen Modellen berücksichtigen.

Die Validierung anhand von Labormodellen bietet den Vorteil, dass einzelne Phänomene gut isoliert werden können und Messdaten in großer Genauigkeit und Dichte erhoben werden können. Bei der Übertragbarkeit auf den Naturmaßstab müssen allerdings Skalierungseffekte berücksichtigt werden. Daher sollte neben der Validierung anhand von Labormodellen immer auch Naturdaten herangezogen werden. Die Validierung anhand von Naturmessdaten wird in der BAW in jedem Projekt angestrebt und soweit die Datenlage es zulässt durchgeführt. Daher wurde in diesem FuE-Projekt der Fokus auf die Validierung anhand von Labormodellen gesetzt. Analytische Lösungen für morphologische Prozesse im Bereich Geschiebetransport sind nur sehr eingeschränkt vorhanden. Zudem müssen die Gleichungen sehr weit vereinfacht werden (z.B. ohne Rauheit, ohne Turbulenz, Einkorn...), um eine analytische Lösung zu ermöglichen. Es wurde davon ausgegangen, dass die Validierung anhand von analytischen Lösungen bereits von den Entwicklern der numerischen Programme durchgeführt wurde.

Innerhalb des Projektes wurden bei drei Rinnenversuchen an der BAW Messdaten erzeugt, die speziell geeignet sind, numerische Modelle zu validieren. Da die Erhebung der Messdaten und die an diesen Daten vorgenommenen Validierungen eng miteinander verknüpft sind, werden letztere hier vorgestellt und nicht im Kapitel 2.2 „Validierung bestehender FT-Programme“.

2.1.1 Einschnürungsrinne

Die Einschnürungsrinne wurde zur Validierung von numerischen Feststofftransportmodellen für den Fall Einschnürung konzipiert. Die Einschnürung ist ein typisches Phänomen an Bundeswasserstraßen, das z.B. durch Buhnen induziert wird und in dessen Folge es zu Kolken und Anlandungen kommt. Die Rinne wurde 2000 im Rahmen einer Diplomarbeit aufgebaut und 10 Jahre später wieder abgebaut. Die aus den Randbedingungen, wie Hallenplatz, maximal verfügbares Wasser und bereits vorhandenes Material, resultierenden Modellversuche,

erwiesen sich als erstaunlich komplex: starke dreidimensionale Effekte, durch das Breiten-Tiefen-Verhältnis keine eindeutige Flachwasserströmung, starke turbulente Effekte beim Bewegungsbeginn. Die Herausforderung, diesen komplexen Rinnenversuch numerisch zu modellieren, wurde auch außerhalb der BAW von verschiedenen Institutionen und mit unterschiedlichen zweidimensionalen (Weise, 2001), (Marek, Dittrich, 2004), (Lai, Greimann, 2010) und dreidimensionalen Programmen (Bihs, Olsen, 2007), (Bui, Rodi, 2008), (Grafmüller, 2009) (Merkel, 2011) angenommen.

Der Aufbau der Rinne, erste Messungen und Vergleiche mit numerischen Ergebnissen sind in einer Diplomarbeit (Weise, 2001) beschrieben. Ein reger Austausch mit den Modellierern an den Hochschulen führte zu einer weiteren Messreihe 2007/2008 nach Restauration der Laborrinne. Für beide Messreihen wurde Kies verwendet. Bei einer dritten Messreihe 2009/2010 wurde Sand als Sohlmaterial verwendet. Die Zusammenfassung aller Versuche und Messungen der Messreihe 2007/2008 befindet sich in dem BAW-Bericht (BAW, 2009) und für die Messreihe 2009/2010 im BAW-Bericht (BAW, 2011).

Für beide Materialien wurde zunächst ein Abfluss gewählt, der das Material nicht bewegt. Die sogenannten Hydrodynamik-Versuche dienen der Validierung der Hydrodynamik. Anhand von Wasserspiegelmessungen in Rinnenmitte, flächig gemessenen Wasserspiegeln und Geschwindigkeitsmessungen in verschiedenen Querprofilen wird die Strömungssituation in der Rinne gut repräsentiert. Bei den Kiesversuchen war der Wasserspiegel bei gerade noch unbeweglicher Sohle so unruhig, dass zusätzlich ein Versuch mit kleinerem Abfluss durchgeführt wurde, um ein qualitativ höherwertiges Messergebnis zu erzielen. Bei höheren Abflüssen geriet die Sohle in Bewegung. Die sogenannten Morphodynamik-Versuche wurden zur Validierung der Sohländerungen nach einem gewissen Zeitraum konzipiert. Der Versuch M1 entspricht etwa dem morphologischen Grenzabfluss, bei dem nur vereinzelte Körner in Bewegung sind und es noch zu keinem flächigen Geschiebetransport kommt. Der Versuch M2 weist eine deutliche Sohlumlagerung auf. Allerdings war die Sohlreaktion der Kiesversuche 2007/2008 bei gleichem Abfluss deutlich kleiner als 2000/2001, so dass ein Versuch M3 bei gleichem Abfluss, aber 40 mm geringerem Wasserspiegel und damit höherem Wasserspiegelgefälle zusätzlich durchgeführt wurde.

Die vorher eingeebnete Sohle wurde nach Versuchsende flächig vermessen. Wasserspiegelmessungen wurden während des gesamten Versuchsablaufs mit Hilfe der Wasserspiegelmessstöpsel erhoben. Zusätzlich fanden zu Versuchsende Geschwindigkeitsmessungen in verschiedenen Profilen statt. Eine Übersicht der Kies- und Sand-Versuche und ihrer Messungen zwischen 2007 und 2010 zeigen Tabelle 1 und Tabelle 2.

Name	Abfluss [m ³ /s]	Messungen	Jahr
Hydrodynamik-Versuch H1	40	Wasserspiegel Flächiger Wasserspiegel 3D-PTV	16.11.2007 09.01.2008 28.03.2008 02.04.2008

			30.04.2008
Hydrodynamik- Versuch H2	80	Wasserspiegel	11.10.2007 03.06.2008 04.06.2008 05.06.2008 10.06.2008 11.06.2008 13.08.2008
Morphodynamik- Versuch M1	130	Wasserspiegel Sohllage nach Versuchsende	03.04.2008 15.08.2008
Morphodynamik- Versuch M2	150	Wasserspiegel Sohllage nach Versuchsende	08.04.2008 20.08.2008
Morphodynamik- Versuch M3	150 40 mm ge- ringerer Wasserstand	Wasserspiegel Sohllage nach Versuchsende	11.04.2008 16.04.2008 24.04.2008 25.11.2008 04.12.2008

Tabelle 1: Übersicht der Kies-Versuche

Name	Abfluss [m ³ /s]	Messungen	Jahr
Hydrodynamik- Versuch H1	35	Wasserspiegel Flächiger Wasserspiegel 3D-PTV Oberflächengeschwindigkeit 3D-PTV Geschwindigkeitsmessungen MIGS	12.07.2010 13.07.2010 14.07.2010
Morphodynamik- Versuch M1	50	Wasserspiegel Sohllage nach Versuchsende Videoaufzeichnungen von Kolkbildung und Ablagerungen	31.05.2010 31.05.2010 25.06.2010
Morphodynamik- Versuch M2	60	Wasserspiegel Sohllage nach Versuchsende Videoaufzeichnungen von Kolkbildung und Ablagerungen	02.02.2009 04.02.2009 10.02.2009 12.02.2009 26.05.2010 18.02.2009 06.07.2010

Tabelle 2: Übersicht der Sand-Versuche

Bei dem Vergleich der verschiedenen numerischen Ergebnisse zu den Kiesversuchen, kann folgendes festgestellt werden:

- Für eine sehr gute Wiedergabe der gemessenen Hydrodynamik ist eine dreidimensionale Modellierung notwendig.

- Die Aufweitzungszone ist extrem schwierig zu modellieren. Eine befriedigende Modellierung scheint nur unter Berücksichtigung des Ungleichgewichtstransport möglich (Bui, Rodi 2008), (Lai, Greimann, 2010). Wie erwartet sind die dreidimensionalen Ergebnisse besser als die zweidimensionalen.
- Die Erosion in der Einschnürungszone ist durch unterschiedliche Rauheiten der Seitenwände beeinflusst. Durch die geringe Rinnenbreite sind die Wandeinflüsse nicht zu vernachlässigen und entsprechend zu modellieren.

Verglichen mit den Kiesversuchen wurden die Sandversuche bisher nur vereinzelt und unveröffentlicht zur Validierung herangezogen. Weitere Auswertungen sind daher wünschenswert. Vor allem da die beim Kiesversuch gefundenen Einstellungen auch im Sandversuch eingesetzt werden können und so eine mögliche Prognosequalität überprüft werden kann.

Für das Verfahren Telemac ist eine Verbesserung der Modellierung des Ungleichgewichtstransport geplant. Die bisherige Implementation brachte keine Verbesserung bei der Modellierung der in der Aufweitzungszone entstehenden Düne. Sowohl eine verbesserte Implementierung des Ungleichgewichtstransportes als auch die Anwendung auf diesen Laborversuch wurde nicht in diesem Projekt realisiert.

2.1.2 Dünenuntersuchungen an einer morphologischen Systemrinne (blaue Rinne)

In der morphologischen Systemrinne werden seit 2010 Dünenversuche durchgeführt. Dafür wurde die Rinne in zwei Hälften mit je 2 m Breite und 30 m Länge geteilt. Die meisten Versuche fanden in der linken Hälfte statt. Die rechte Hälfte wurde dafür verwendet, zunächst die gleichen Dünen wie in der ersten Hälfte entstehen zu lassen und anschließend zu fixieren. So entstand ein Versuch, in dem nur die Hydrodynamik über den Dünen genau vermessen werden konnte. Mit diesen Hydrodynamikversuchen kann die Hydrodynamik eines numerischen Verfahrens unabhängig von der Morphodynamik gut validiert werden.

Folgende Veröffentlichungen beschäftigen sich mit den Messungen und den Auswertungen der Dünenversuche in der blauen Rinne.

- LWI (2008)
- Richter, K. (2011)
- Haber, B. (2012)
- Hentschel, B., Henning, M., Hüsener, T. (2012)
- Henning, M. (2013)
- Henning, M. (2013)
- Schneider, M. (2013)
- Thielmann, S. (2013)
- Mietz, S.K., Hentschel, B. (2015)

Anhand dieser Messdaten wird seit 2010 das dreidimensionale Modell Telemac3D gekoppelt mit dem morphodynamischen Modul Sisyphé (www.opentelemac.org) zur Dünenmodellierung eingesetzt. Es hat sich gezeigt, dass eine Dünenentwicklung und -bewegung nur mit einem dreidimensionalen Modell modellierbar ist. Des Weiteren ist die genaue Abbildung des vertikalen Geschwindigkeitsprofil entscheidend, sowie die Turbulenzmodellierung und die Berücksichtigung von Druckschwankungen. In folgenden Veröffentlichungen wird die numerische Modellierung der Dünenversuche beschrieben.

- Goll, A. (2011)
- Goll, A., Kopmann, R., Brudy-Zippelius, T. (2011)
- Goll, A., Kopmann, R. (2012a)
- Goll, A., Kopmann, R. (2012b)
- Goll, A., Kopmann, R., Villaret, C., (2013)
- Goll, A., Kopmann, R., Baron, M. (2013)
- Goll, A. (2014)

Seit 2012 gibt es in der BAW ein eigenes Forschungsvorhaben (A39530570001), das sich mit der Modellierung von Dünen beschäftigt: „Numerische Modellierung von Transportkörpern (Dünen) in Binnenwasserstraßen“. Daher wird für weitere Ergebnisse auf dieses Forschungsvorhaben verwiesen.

2.1.3 Bühnenuntersuchungen an einer langen Rinne (grüne Rinne)

An einer 62,9 m langen, geraden und 2,5 m breiten Rinne mit fester Sohle wurde seit 2010 die hydraulische Wirkung von geometrischen Änderungen in Bühnenstrecken untersucht. Darüber hinaus wurden anhand der detaillierten Messungen aus diesen Untersuchungen numerische mehrdimensionale Verfahren validiert. Da eine gute Modellierung der Hydrodynamik eine Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Modellierung des Feststofftransportes darstellt, waren die ausschließlich hydrodynamischen Untersuchungen trotzdem für das vorliegende Forschungsvorhaben von Interesse. Die wesentlichen Ergebnisse der Validierung der numerischen Verfahren sollen hier kurz zusammengefasst werden.

Im Rahmen eines Auftrags an das Ingenieurbüro Baron wurden numerische Validierungssimulationen mit den Programmen UnTrim (Casulli, Zanolli, 2002) und Telemac sowohl zweidimensional als auch dreidimensional durchgeführt.

Die Wasserspiegellagen konnten auch mit den zweidimensionalen Verfahren gut wiedergegeben werden. Bei der Abbildung der Abflussverteilungen zwischen Bühnen- und Hauptströmung erreichten die dreidimensionalen Modelle eine bessere Übereinstimmung mit den Messdaten. Die Prognose der Hydrodynamik von Bauwerksvarianten mit den in der Ausgangsvariante ermittelten Parametern gelang nicht für alle numerischen Verfahren für alle

Varianten in gewünschter Qualität. Dabei zeigte Telemac-3D mit nicht-hydrostatischem Druckansatz die besten Übereinstimmungen mit den Messergebnissen.

Weitere Details sind den folgenden Veröffentlichungen über die Vergleiche zwischen Messungen in der grünen Rinne und den numerischen Berechnungen zu entnehmen.

- Hüsener, T., Faulhaber P., Baron, M. (2012)
- Baron, M. (2013)
- Baron, M., Patzwahl, R. (2013)
- Goll, A., Kopmann, R., Baron, M. (2013)

Folgende Veröffentlichungen befassen sich mit den Messungen in der grünen Rinne.

- Hüsener, T., Faulhaber P., Baron, M. (2012)
- Grafmüller, G. (2012)
- Hübner, O. (2013)
- Lüder, N. (2015)

2.2 Validierung bestehender FT-Programme

Anhand einer Literaturstudie (Schankat, Wieprecht, 2006) wurden geeignete Messdatensätze zur Validierung bestehender FT-Verfahren ausfindig gemacht. Dabei wurden gezielt Messdaten gesucht, die die für die Projektarbeit in der BAW relevanten morphodynamischen Phänomene betrachten. Die berücksichtigten Phänomene sind:

- Einfluss Hydrologie
- Einfluss Schifffahrt
- Einfluss von Krümmungen
- Transportkörper
- Sohlaufbau
- Wirkung von Bauwerken
- Wirkung von Breitenänderungen
- Wirkung außerhalb der Flussrinne
- Zugabe und Entnahme von Sohlmaterial

Insgesamt wurden 186 Laborversuche genauer geprüft, wobei 43 davon als gut geeignet zur Validierung numerischer Modelle befunden wurden. Für alle Kategorien wurde jeweils ein Laborversuch favorisiert und entsprechend detaillierter beschrieben. Allerdings gab es nicht für alle oben genannten Kategorien mindestens einen gut geeigneten Laborversuch. Für Validierungen wurden nur die Laborversuche aus der Kategorie „gut geeignet“ herangezogen. Daher wurden bisher keine Validierungen zu den Einflüssen von Hydrologie und Schifffahrt vorgenommen. Die Wirkung von Breitenänderungen wurde anhand des BAW-eigenen Laborversuchs „Einschnürungsrinne“ (siehe Kapitel 2.1.1) untersucht. Der Modellierung von Transportkörpern widmet sich inzwischen ein eigenes Forschungsvorhaben zu dem auch Versuche zu Dünenentwicklungen in der BAW gehören (siehe Kapitel 2.1.2).

Ziel dieser Validierungen anhand von Laborversuchen war es, die Anwendbarkeit und Grenzen der in der BAW verwendeten Verfahren zur FT-Modellierung für diese bestimmten Phänomene aufzuzeigen und ggf. zu verbessern.

Verschiedene Ingenieurbüros wurden mit den Validierungen beauftragt, die diese in enger Abstimmung mit der BAW bearbeitet haben. Im Folgenden sind die Ergebnisse kurz in der jeweiligen Kategorie zusammengefasst. Detaillierte Ausführungen sind den jeweiligen Literaturangaben zu entnehmen.

2.2.1 Validierung des Einflusses von Krümmungen

Der **180°-Krümmer von Yen und Lee** (1995) wurde bereits vor der Literaturstudie zur Validierung des Einflusses von Krümmungen eingesetzt (Kopmann 2006). Ausgehend von einer ebenen Sohle entwickelt sich über eine instationäre dachförmige Abflussganglinie ein typisches Gleithang / Prallhang Profil in dem 180°-Krümmer. Zweidimensionale Modellierungen mit Telemac-2D / Sisyphé zeigten gute Übereinstimmungen.

Der in der Literaturstudie empfohlene **Laborversuch von Wormleaton et al.** (2005) ist ein Meanderversuch mit einer Länge von 35 m und einer Breite von 10 m. Der Verlauf des Hauptgerinnes entsprach einer Sinuskurve mit einem trapezförmigen Querschnitt. Dieser Laborversuch wurde zweidimensional tiefengemittelt mit Telemac-2D und Sisyphé (Westfahl, 2007, Rátky 2008) sowie mit Telemac-2D/SediMorph (Westfahl, 2007) modelliert. Die Ergebnisse mit Telemac-2D/Sisyphé ergaben wie schon beim 180°-Krümmer gute Übereinstimmungen mit den Messungen. In SediMorph war kein Sekundärströmungsansatz implementiert, so dass keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden konnten.

Darüber hinaus wurden von Riesterer et al. (2013) mit Telemac-3D/Sisyphé und SSIIM vergleichende dreidimensionale Modellierungen durchgeführt. Seit 2011 laufen diese Arbeiten in einem eigenen Forschungsvorhaben „Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte und Transportphänomene in morphodynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen“. Die dreidimensionalen Modellierungen stimmen erwartungsgemäß mit den Messungen lokal besser überein (Riesterer et al., 2015). Für detailliertere Vergleiche und Auswertungen wären weitere Messdaten wünschenswert gewesen, die aber auch nicht auf Nachfrage von dem entsprechenden Institut zu bekommen waren. Riesterer (IWG, 2014) konnte auch durch eine Weiterentwicklung des Sekundärströmungsansatzes die tiefengemittelten Ergebnisse weiter verbessern (Kapitel 2.4.3).

2.2.2 Validierung von Transportkörpern

Der in der Literaturstudie empfohlene **Laborversuch von Damgaard et al.** (2003) befasst sich mit dem Sandtransport an steil geneigten Ebenen. Das Ziel dieses Versuches war es,

herauszufinden, wie sich Sedimenttransportmechanismen für verschiedene Kornverteilungen an geneigten Ebenen verhalten. Die Ergebnisse zeigten, dass die Bettformen einen maßgeblichen Einfluss auf die Sedimenttransportrate nehmen. Dieser Laborversuch wurde von Westfahl (2007) mit Telemac-2D/Sisyphé und Telemac-2D/Sedimorph modelliert. Aufgrund von numerischen Instabilitäten am Auslauftrand, die während des Vertragszeitraumes nicht gelöst werden konnten, konnten die Simulationsergebnisse nicht sinnvoll ausgewertet werden.

Der Versuch wurde nicht weiter verfolgt, da der Themenkomplex Transportkörper seit 2012 in einem eigenen Forschungsvorhaben untersucht wird (siehe Kapitel 2.1.2).

2.2.3 Validierung von Sohlaufbau

Günter (1971) führte im Rahmen seiner Dissertation verschiedene **Versuche** zum Sohlstabilisierungsverhalten im Hinblick auf Deckschichtzusammensetzung, Gefälleverhältnisse und Abflussbelastung durch. Die dort auftretende sogenannte Erosionsrotation konnte von Imiela (2003) mit Telemac-2D/Sisyphé und einem Hirano-Ansatz simuliert werden. Allerdings mussten verschiedene Eingangparameter für jeden Versuch wieder neu kalibriert werden. Eine bessere Prognosefähigkeit konnte unter Verwendung des CVSM (continuous vertical sorting model) (siehe Kapitel 2.4.2) bei Modellierungen von Anleu (2012) erreicht werden.

Der in der Literaturstudie empfohlene **Laborversuch von Blom et al.** (2003) befasst sich mit der vertikalen Sortierung von Sedimentgemischen durch Dünen-transport. Mit einer natürlichen Sedimentmischung aus dem Rhein und einer künstlichen trimodalen Sedimentmischung wurden insgesamt acht Versuche in einer 50 m langen und 1 bzw. 1,5 m breiten Rezirkulationsrinne durchgeführt.

Der Laborversuch wurde von Westfahl (2007) mit Telemac-2D/Sisyphé und Telemac-2D/Sedimorph und von Merkel (2011) mit Telemac-2D/Sisyphé und Telemac-3D/Sisyphé simuliert. Konnte 2007 nur mit einem Einkornansatz gerechnet werden, gelang die Modellierung 2010 auch mit Mehrkornansatz. Da die Sortierungsprozesse stark von dem Dünen-transport geprägt sind, unterliegt die Modellierung mit Dünen als Formrauheiten von vorne herein einer Unschärfe. Mit dem neuen Mehrschichtansatz von Merkel (2011), Merkel (2012b) konnten trotzdem vielversprechende Ergebnisse erzielt werden.

2.2.4 Validierung von Bauwerken

Für die Entwicklung von optimalen und kostengünstigen Restaurationsvarianten von Bühnen wurde an der BAW in einem Labormodell Untersuchungen durchgeführt. Das **Labormodell** wurde entsprechend einem schematisierten Elbeabschnitt bei **Schönberg** als Halbmodell (mit halbiertem Querschnitt) mit einer leichten Krümmung und 8 Bühnen und fester Sohle in einem Maßstab von 1:30 aufgebaut. Mit einem zweidimensionalen numerischen Modell (Telemac-2D) wurden begleitende Untersuchungen durchgeführt (Walzer, 2000). Um Aussa-

gen zur Modellierung von Bühnenkopfkolken treffen zu können, wurde ein Geschiebekoffer mit einem Ersatzmaterial aus Polyester eingebaut. Der Geschiebekoffer erstreckte sich über zwei Bühnenfelder. Nzokou (2002) modellierte den Bühnenkopfkolk mit Telemac-2D/Sisyphé. Es zeigte sich, dass trotz der ausgeprägten Dreidimensionalität der Bühnenkopfkolkströmung das zweidimensionale Modell generell in der Lage ist, Bühnenkopfkolke zu simulieren. Allerdings kann die Lage der Bühnenkopfkolke nicht exakt simuliert werden. Im Labormodell wurden direkt vor dem Bühnenkopf ein etwas schwächerer und leeseitig ein tieferer Bühnenkopfkolk modelliert. Das zweidimensionale Programm war nur in der Lage den Bühnenkopfkolk vor der Bühne zu simulieren. Die Tiefe des Bühnenkopfkolks vor der Bühne wurde vom numerischen Modell um etwa 10 % überschätzt.

In einer Vertiefungsarbeit an der Uni Darmstadt (Ayboga 2002) wurde der Bühnenkopfkolk einer Knickbühne im Schönbergmodell mit dem Programm Timor simuliert. Es wurde resümiert, dass Timor in der Lage ist, die Erosion an einer Bühne ausreichend gut darzustellen. Allerdings wurde ebenfalls darauf hingewiesen, dass für eine detailliertere Untersuchung der stark dreidimensionalen Strömungsvorgänge an Bühnenkopfkolken, eine dreidimensionale Modellierung vorzuziehen ist.

In dem in der Literaturstudie empfohlenen **Laborversuch von Gaudio et al. (2003)** wurde die zeitliche Entwicklung von Kolken nach Sohlschwellen in einer 6,75 m langen und 60 cm breiten Rinne untersucht. Die Auswertung der zeitlichen Entwicklung der Kolkentiefe zeigte, dass sich der Kolk sehr rasch ausbildete und sich ein morphologisches Gleichgewicht einstellte. Der Laborversuch wurde von Westfahl (2007) mit Telemac-2D/Sisyphé und Telemac-2D/Sedimorph untersucht. Auch bei diesem Laborversuch kam es mit beiden Verfahren zu numerischen Instabilitäten, die während der Vertragslaufzeit nicht gelöst werden konnten. Für Telemac-2D/Sisyphé wurden diese Probleme weiter verfolgt und gelöst. Anschließend konnte Rátky (2008) für den Laborversuch zufriedenstellende Ergebnisse modellieren.

2015 wurden in der grünen Rinne der BAW (siehe 2.1.3) Versuche zu Bühnenkopfkolken durchgeführt. Diese konnten nicht mehr im Rahmen dieses Forschungsvorhabens numerisch modelliert werden.

2.2.5 Validierung außerhalb der Flussrinne

In dem in der Literaturstudie empfohlenen **Laborversuch von Knight und Brown (2001)** wurde in Sandrinnen unter Gleichgewichtsbedingungen Untersuchungen zu überfluteten Vorländern durchgeführt. Ziel dieses Versuches war es, allgemeine, zonale und lokale Sohlrauheiten für verschiedene Abflusssituationen zu finden, die natürlichen alluvialen Flüssen entsprechen. Westfahl (2007) modellierte diesen Laborversuch mit Telemac-2D/Sisyphé und Telemac-2D/Sedimorph. Der Laborversuch befand sich im morphologischen Gleichgewicht. Allerdings traten im Labormodell vor allem im Fall mit überflutenden Vorländern Dünen auf.

Diese mussten im numerischen Modell mit erhöhten Formrauheiten abgebildet werden. Die kalibrierten Formrauheiten wurden anschließend mit zwei Dünenformeln verglichen. Für den Fall ohne Vorlandüberströmung trafen die Dünenformeln die kalibrierten Formrauheiten sehr gut. Die Abflussverteilung zwischen Vorland und Hauptgerinne und die mittleren Sohllagen wurden von beiden Modellen gut getroffen.

2.2.6 Langzeitmodellierung

Für eine belastbare Bewertung der morphodynamische Flussentwicklung ist es unabdingbar Szenarienrechnungen über möglichst lange Zeiträume durchführen zu können. Bedingt durch die immer noch hohen Rechenzeiten der mehrdimensionalen numerischen FT-Modelle sind hier eindimensionale Modelle weiterhin deutlich im Vorteil. Für die mehrdimensionalen Modelle existieren verschiedene Strategien, die langfristige Simulationen unter Wahrung einer geforderten Genauigkeit ermöglichen. In einer Diplomarbeit wurden Langfristsimulationen zum morphologischen Gleichgewicht für eine Renaturierungsmaßnahme an der Enz durchgeführt (Imiela 2003). Um die Rechenzeiten zu verkürzen wurden nur Zeiträume mit geschiebewirksamen Abflüssen simuliert. In einer Literaturstudie zu Langzeitstrategien für morphodynamische Modelle (Gebler, Wieprecht, 2008) wurde der Stand der Wissenschaft abgefragt. Dabei wurden Strategien zur Rechenzeitverkürzung in den drei Kategorien Modellgestaltung, Eingabefilterung und Modellsteuerung gefunden. Zu der ersten Kategorie gehören die Minimierung des Modellgebietes, die Kopplung von Modellen unterschiedlicher Dimensionalität und die Vergrößerung der Netzauflösung. Bei der Eingabefilterung werden die Abflussganglinie, die Kornverteilung bzw. Schwebstoffkonzentration oder die Wasserspiegellage gekürzt, abstrahiert oder vereinfacht. In der Modellsteuerung werden die Zeitschrittlängen an die morphologische Aktivität angepasst, die Kopplung zwischen Hydrodynamik und Morphologie variiert und die morphologischen Veränderungen extrapoliert. Die gefundenen Strategien werden in der Studie nicht miteinander verglichen. In der Praxis kommen oft mehrere Strategien zum Einsatz, da diese eher neben einander stehen als konkurrierend. Abschließend werden in der Studie Vergleichsrechnungen ohne Verkürzungsstrategie unbedingt empfohlen, um die geforderten Genauigkeiten einhalten zu können. Darüber hinaus wird der Einsatz von Zuverlässigkeitsmethoden vorgeschlagen, um die Unsicherheiten bei Langfristsimulationen besser abschätzen zu können.

Der Aspekt der Langfristsimulation wurde in dem FuE-Projekt „Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes“ detailliert untersucht (Schröder, Wurms 2014). In dem Projekt konnten 40 km Rhein über 50 Jahre erfolgreich morphodynamisch modelliert werden. Dabei wurden Strategien aus allen drei genannten Kategorien verwendet und anschließend verglichen mit Simulationen ohne Zeitverkürzungsstrategien. Wesentlich war dabei die Verwendung eines morphologischen Faktors, der bei Stauchung der Abflussganglinie eine Extrapolation der Morphodynamik

innerhalb eines Zeitschrittes erlaubt. Dies führte für das genannte Beispiel zu einer Verringerung der Simulationszeiten um Faktor 10 bei vergleichbaren Simulationsergebnissen.

2.2.7 Bewertung der Validierungen

Für die FT-Modellierung im Binnenbereich wird in der BAW derzeit standardmäßig das Verfahren Telemac-2D/Sisyphé eingesetzt. Die in diesem Forschungsprojekt durchgeführten Validierungen zeigen die Anwendbarkeit und Grenzen für das jeweilige Beispiel einer Kategorie. Die Übertragbarkeit anhand des einen Beispiels auf die gesamte Kategorie muss sorgfältig abgewogen werden. Die folgende Zusammenfassung stützt sich zusätzlich auf Modellierungserfahrungen in weiteren Projekten der BAW.

Telemac-2D/Sisyphé ist in der Lage **Effekte aus Krümmungen** mit einer genügenden Qualität abzubilden. Bei leichten Krümmungen reicht der einfache Ansatz nach Engelund, bei stärkeren Krümmungen sollte der von Riesterer (IWG, 2014) verbesserte Ansatz verwendet werden bzw. dreidimensionale Vergleichssimulationen durchgeführt werden. **Transportkörper** können zweidimensional nur durch entsprechende Parametrisierung der Formrauheit berücksichtigt werden. Explizite Abbildung von Dünen ermöglichen nur dreidimensionale Modelle. In der Literatur wird berichtet, dass alternierende Bänke auch mit zweidimensionalen Modellen simuliert werden können (z.B. (Mewis, 2012), (Mattia et. al. 2013)). Dazu fanden in dem Forschungsvorhaben jedoch keine Untersuchungen statt. Die Modellierung des **Sohlaufbaus** ist numerisch machbar und zeigt auch qualitativ plausible Ergebnisse. Allerdings unterliegt sie stark sensitiven Parametern, die sich nicht ohne weiteres auf andere Situationen übertragen lassen. Dies ist insbesondere problematisch, da in der Natur oft keine ausreichenden Daten zum Sohlaufbau zur Verfügung stehen, die eine belastbare Kalibrierung ermöglichen würden. Das in dem Projekt entwickelte vertikale Sortierungsmodell CVSM zeigte vielversprechende Ergebnisse und wird derzeit an zwei Projektbeispielen auf seine Anwendbarkeit getestet.

Die **Wirkung von Bauwerken** ist zweidimensional nur bis zu einer gewissen Genauigkeit möglich. Für Streckenmodelle, die im Wesentlichen den Fokus auf die langfristige großräumige Entwicklung der Sohle haben, ist die Genauigkeit in der Regel ausreichend. Für lokale Aussagen zu bestimmten Bauwerkskolken oder Anlandungszonen sollte ein dreidimensionales Modell genutzt werden. Für die **Wirkung von Breitenänderungen** gilt ähnliches, wie für die Wirkung von Bauwerken. Der generelle Effekt wird gut vom zweidimensionalen Modell gut erfasst. Für lokale detaillierte Aussagen sollte aber ein dreidimensionales Modell zum Einsatz kommen. Unter der Kategorie **Wirkung außerhalb der Flusssrinne** können eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Phänomene verstanden werden (bspw. Erosion und Verlandung auf Vorländern, Bühnenfeldentwicklungen, oder Altarmen). Der untersuchte Anwendungsfall bezieht sich nur auf die Berücksichtigung von rauen Vorländern. Eine allgemeine Aussage kann daher zu dieser Kategorie nicht getroffen werden.

Der **Einfluss von Hydrologie und Schifffahrt**, sowie die **Zugabe und Entnahme von Sohlmaterial** sind trotz der langen Laufzeit in diesem Forschungsvorhaben nicht näher untersucht worden. Es wird daher vorgeschlagen eigene Forschungsvorhaben dafür zu generieren. Das gleiche gilt für die nur in sehr kleinen Ansätzen betrachtete **Wirkung außerhalb der Flusssrinne**.

2.3 Einschätzung der erreichten Genauigkeit mit Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung

Im Rahmen der Modellbearbeitung mit numerischen Modellen stellt sich immer wieder die Frage nach der Genauigkeit der Untersuchungen. Diese hängt von folgenden Faktoren ab (vgl. z.B. Beck, 1987; Schmitt-Heiderich, 1995):

- Datenunsicherheit: Genauigkeit der Datenerhebung (Messverfahren, Umfang der Stichprobe)
- Parameterunsicherheit: Verteilung der Daten in der Natur (natürliche Variabilität der Daten, Zufälligkeit)
- Modellunsicherheit: Genauigkeit der Abbildung der Natur im Modell (Diskretisierung, Rechengenauigkeit, Modellstruktur, Parametrisierung bekannter Prozesse, Auswirkungen unbekannter Prozesse – Unsicherheit aus Mangel an Informationen über diese Prozesse, Annahmen)

Strukturelle Unsicherheit: Kenntnis über die Bauwerke bzw. die abzubildende Struktur
Häufig ist die Genauigkeit der Datenerhebung grob bekannt. So kann z.B. die Flusssohle auf etwa +/-10 cm genau gepeilt werden. Auch die Ermittlung von Wasserspiegeln liegt in diesem Genauigkeitsbereich. Dagegen ist meist nicht bekannt, wie genau die ermittelten Korngrößen der Flusssohle deren mittlere Kennwerte wiedergeben. Zudem ist auch die natürliche Variabilität nur in Einzelfällen bekannt, da die Probenahme sehr aufwendig ist und daher nur wenige Proben vorliegen, so dass aus der Stichprobe nur sehr ungenau auf die Verteilung der Daten in der Natur geschlossen werden kann.

Die Genauigkeit der Modelle wird in jedem Anwendungsfall über die Kalibrierung und Validierung annäherungsweise ermittelt. Sofern die Modelle innerhalb ihrer Zulässigkeitsgrenzen angewendet werden, kann von einer ausreichenden Genauigkeit ausgegangen werden. Fehler in der Verwendung von Daten und im Modell selber können nicht ausgeschlossen, aber auch nur sehr schwer erkannt werden. Hier ist die Erfahrung des Anwenders gefragt, der bei unplausiblen Werten eine Sensitivitätsuntersuchung oder Plausibilisierung der infrage kommenden Parameter vornehmen muss.

Damit ergibt sich als Hauptunsicherheit die Verteilung der Daten in der Natur. Diese kann mit Hilfe von Zuverlässigkeitsanalysen abgeschätzt und ihre Wirkung auf die Modellergebnisse ermittelt werden. (aus BAW, 2002)

Im Rahmen des Projektes wurden drei Zuverlässigkeitsmethoden angewendet.

- Zuverlässigkeitsmethode 1. Ordnung (First-Order Second Moment (FOSM))
- Monte-Carlo Methode
- Metamodellierung

2.3.1 Beschreibung der Zuverlässigkeitsmethoden

In allen nachfolgenden Zuverlässigkeitsmethoden wird lediglich der Einfluss von unsicheren Eingangsparametern auf das Ergebnis abgeschätzt und nicht die gesamte in einem numerischen Modell enthaltene Unsicherheit betrachtet. Ein erster Schritt ist bei allen Methoden die Festlegung, welche Eingangsparameter als unsicher angenommen werden. Diese müssen dann mit einer entsprechenden Wahrscheinlichkeitsverteilung belegt werden. Die einfachste Annahme ist eine Normalverteilung. Für die Zuverlässigkeitsmethode 1. Ordnung ist dies auch eine Voraussetzung. Monte-Carlo oder Metamodellierung können auch mit beliebigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen verwendet werden. In dem Projekt wurden bisher neben der Normalverteilung nur „doppelt“ (zweiseitig) normalverteilte, sowie gleichverteilte Eingangsparameter untersucht. Für die Beschreibung einer Normalverteilung reicht die Angabe des Mittelwertes und der Standardabweichung. Für doppelte Normalverteilung benötigt man neben dem Mittelwert zwei Standardabweichungen.

Das Ergebnis der Zuverlässigkeitsmethoden ist ein Konfidenzintervall oder im Fall der Metamodellierung auch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ergebnisvariablen, also für FT-Modelle in erster Linie der Sohle aber auch der Wasserstände und Geschwindigkeiten.

2.3.1.1 Zuverlässigkeitsmethode 1. Ordnung

Methoden 1. Ordnung sind für lineare bzw. schwach nicht-lineare Probleme geeignet. Die First-Order Second Moment (FOSM) Methode setzt neben dem linearen Verhalten des Modells hinsichtlich der unsicheren Parameter auch eine Gauß-Verteilung aller unsicheren Eingangsparameter, sowie der Ergebnisvariablen voraus.

Für eine Ergebnisvariable, hier als Beispiel die Wassertiefe $H_k = H(x_k, p_i)$, in Abhängigkeit verschiedenen unsicherer Eingangsparameter p_i und der räumlichen Lage x_k wird eine Taylorreihenentwicklung bis zur 1. Ordnung durchgeführt. Mit FOSM kann die Varianz abgeschätzt werden

$$Var(H_k) \approx \frac{\partial H_k}{\partial p_i} \cdot Cov(p_i) \cdot \frac{\partial H_k}{\partial p_i} \quad (1)$$

wobei $\frac{\partial H_k}{\partial p_i}$ der Vektor der partiellen Ableitungen („Sensitivitäten“) der Wassertiefen H_k bezüglich aller Parameter p_i ist. Die Kovarianzmatrix $Cov(p_i)$ zwischen allen unsicheren Parametern muss aus Messungen oder Literaturwerten abgeschätzt werden. Kann angenommen werden, dass

p_i nicht korreliert sind, vereinfacht sich die Varianz zu

$$Var(H_k) \approx \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial H_k}{\partial p_i} \right)^2 \cdot \sigma_{p_i}^2 \quad (2)$$

mit der Varianz $\sigma_{p_i}^2$ der Parameter p_i . Unter Annahme der Gaußverteilung können die Konfidenzintervalle für die Ergebnisvariablen abgeleitet werden. Das 68% Konfidenzintervall entspricht dem Mittelwert plus/minus der einfachen Standardabweichung. Das technisch relevante 95% Konfidenzintervall ergibt sich aus dem Mittelwert plus/minus der zweifachen Standardabweichung.

Die Distortion (Verzerrung) ist ein quadratischer Schätzer für Nichtlinearitäten

$$\delta(H_k) \approx \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial H_k}{\partial p_i} \right)^2 \cdot \sigma_{p_i}^2 \ll \sigma(H_k) \quad (3)$$

und sollte sehr viel kleiner als die Standardabweichung sein. Ist dies nicht der Fall, sollten die Methoden 1. Ordnung nicht zur Anwendung kommen.

Um die Zuverlässigkeit des Systems abschätzen zu können, kann ein Zuverlässigkeitsindex β definiert werden. Dafür wird zunächst eine Gütefunktion aufgestellt. Um die Prognosefähigkeit von FT-Modellen abschätzen zu können, kann als Gütefunktion G der angestrebte maximale Unterschied zwischen gemessenen E_{gem} und simulierten E_{sim} Sohländerungen angenommen werden.

$$G(p_i): E^{gem}(p_i) - E^{sim}(p_i) < 10cm \quad (4)$$

Der Zuverlässigkeitsindex berechnet sich nun als Quotient der Gütefunktion mit der Standardabweichung der Sohländerung, die aus der Varianz entsprechend Formel (2) berechnet werden kann.

$$\beta = \frac{E^{gem}(p_i) - E^{sim}(p_i) < 10cm}{\sigma(E)} \quad (5)$$

Mit Hilfe der kumulierten Normalverteilung kann die Wahrscheinlichkeit $P=\Phi(\beta)$ angegeben werden, in der die Werte innerhalb der geforderten Schranken der Gütefunktion liegen. Weitere Details finden sich z.B. in Nikita et al. (2008), Melching (1992)

Die benötigten Sensitivitäten können zum einen mit Hilfe der Finiten Differenzen ermittelt werden, diese Methode wird auch Scatter Analyse oder Numerische Differentiation (ND) genannt oder mit Hilfe von Algorithmischer Differentiation (AD). Letztere hat den Vorteil, dass die Ableitungen exakt ermittelt werden und nur ein einziger Simulationslauf für eine unsichere Variable benötigt wird.

Ableitungen mit numerischer Differentiation

Für die Scatter Analyse oder die numerische Differentiation wird die Ableitung der Ergebnisvariable bezüglich eines unsicheren Parameters numerisch mit Hilfe von Finiten Differenzen ermittelt. Es können Vorwärtsdifferenzen, Rückwärtsdifferenzen oder zentrale Differenzen verwendet werden, wobei letzterer Fall eine höhere Genauigkeit bietet, aber für jeden unsicheren Parameter zwei Simulationsläufe benötigt. Bei Vorwärts- oder Rückwärtsdifferenzen werden N+1 Simulationen benötigt. Die Gradienten werden üblicherweise zwischen dem Ausgangszustand (also dem Mittelwertes des unsicheren Parameters) und dem Zustand Mittelwert + bzw. – Standardabweichung des Parameters berechnet.

$$\frac{\partial H_k}{\partial p_i} = \frac{H(\bar{p}_i \pm \sigma_i) - H(\bar{p}_i)}{\sigma} \quad (6)$$

Eine etwas höhere Genauigkeit bei schwach nicht-linearem Modellverhalten bietet die Berechnung mit zentralen Differenzen, wobei 2N+1 Simulationsläufe benötigt werden.

$$\frac{\partial H_k}{\partial p_i} = \frac{H(\bar{p}_i + \sigma_i) - H(\bar{p}_i - \sigma_i)}{2\sigma} \quad (7)$$

Die Differenz zum zweiten Wert sollte so gewählt werden, dass sich das System im linearen Bereich befindet (Annahme für Verfahren 1. Ordnung). Ist das Verhalten des Modells bezüglich der unsicheren Parameter nicht linear, kann der gewählte Abstand zwischen den beiden Werten für den unsicheren Eingangsparameter entscheidend sein.

Die Berechnung der Standardabweichung für die Ergebnisvariablen (Wasserstand, Sohländerung, Geschwindigkeiten), der Konfidenzschranken, sowie des Zuverlässigkeitsindex erfolgen dann entsprechend der oben aufgeführten Formeln.

Ableitungen mit Algorithmischer Differentiation

Die Algorithmische Differentiation (AD) ist eine Methode, um Ableitungen von ganzen Simulationsprogrammen semi-automatisch zu berechnen. Oft sind dafür nur wenige Anpassungen im Programmcode notwendig. Die Ableitungen der Funktionen in Programmcodes und deren Implementierung kann auch per Hand durchgeführt werden. So ein differenzierter Code wurde im Rahmen einer Doktorarbeit für das Programm Telemac entwickelt und steht heute den Nutzern der quelloffenen Software zur Verfügung (Barros 1996). Allerdings muss der differenzierte Code für jede neue Programmversion nachgeführt werden. Das bedeutet einen erheblichen Aufwand, der oft nicht betrieben wird. Das gilt auch für das Programm Telemac. Die von Hand differenzierte Version ist nicht identisch mit der aktuellen Programmversion. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde das Programm Sisyphé (Modellierung des Sedimenttransports bei gegebener Hydrodynamik) in der Version V5P5 in einer studentischen Arbeit der Ecole d'Ingénieurs en Modélisation Mathématique et Mécanique ebenfalls von Hand differenziert (Papazzoni, 2005).

Dem bei der Differentiation entstehende enorme Aufwand kann mit der Methode der algorithmischen Differentiation begegnet werden. Dabei wird folgendes Prinzip zugrunde gelegt: Das zu differenzierende Programm wird als Folge einzelner elementare Operationen (+, -, *, /, exp, sin, ...) betrachtet. Die Ableitungsregeln für diese Operationen sind bekannt und können durch Kettenregeln miteinander verknüpft werden. Die Folge der einzelnen Funktionsauswertungen kann als Baum dargestellt werden, wobei ein Verzweigungspunkt / Baumknoten jeweils einer Operation entspricht. Eine Operation kann ausgeführt werden, wenn alle Elternknoten ausgewertet sind.

Dabei können zwei Modi verwendet werden: das tangential-lineare Modell (TLM) oder auch Vorwärtsdifferentiation genannt und das adjoint Modell bzw. die Rückwärtsdifferentiation. Beim TLM wird bei jeder Auswertung eines Baumknotens eine partielle Ableitung ausgewertet. Ausgehend von den Elternknoten wird für jeden Baumknoten der Funktionswert und die partielle Ableitung berechnet und gespeichert. Beim adjungierten Modell wird zunächst ein Vorwärtsschritt entsprechend des TLM durchgeführt. Anschließend werden im Rückwärtsmodus (also von den Kinder- zu den Elternknoten) die Adjoint Variablen mit Hilfe der gespeicherten partiellen Ableitungen aus dem Vorwärtsschritt berechnet. Weitere Details zur Algorithmischen Differentiation finden sich bei Naumann (2012).

TLM ist immer dann sinnvoll, wenn der Einfluss von wenigen Parametern auf viele Ergebnisvariablen berechnet werden soll. Dies ist der Fall bei der beschriebenen Zuverlässigkeitsmethode. In den praktischen Anwendungen (siehe Kapitel 2.3.2) wurden bis zu 92 unsichere Parameter hinsichtlich ihres Einflusses auf die Sohländerung an jedem Knoten untersucht. Die Knotenanzahlen liegen in der Praxis eher im Bereich von 100 000 und mehr, also mehrere Größenordnungen höher als die Anzahl der unsicheren Parameter.

Der adjoint Modus kommt zur Anwendung, wenn der Einfluss von vielen Parametern auf wenige Zielgrößen gefragt ist. Dies ist der Fall bei der Optimierung. Bei der automatischen Kalibrierung beispielsweise wird als Optimierungsgröße die Norm der Abweichungen zwischen Messung und Rechnung verwendet, also nur noch eine Zahl. Der adjoint Modus berechnet dann den Einfluss jedes einzelnen Parameters auf diese Zielgröße.

Für Telemac wurde mit Hilfe des AD-enabled NAG Fortran compiler (Naumann, Riehme 2005), (Naumann, NAG 2015) eine algorithmisch differenzierte Version erstellt (Riehme, Naumann, 2015). Der AD-enabled NAG Fortran compiler ist eine gemeinsame Entwicklung von Software and Tools for Computational Engineering Institute (STCE), RWTH Aachen Universität, der Universität von Hertfordshire, und der Numerical Algorithm Group Ltd., Oxford, UK. Mit STCE bestand während des Forschungsvorhabens ein Kooperationsvertrag.

2.3.1.2 Monte-Carlo Methode

Bei einer Monte-Carlo Simulation werden eine Anzahl N Zufallswerte für die unsicheren Eingangsparameter p_i generiert, so dass ihre Wahrscheinlichkeitsverteilung ausreichend genau abgebildet werden kann. Mit diesen Werten müssen dann N Simulationen durchgeführt werden. Die Ergebnisse werden anschließend statistisch ausgewertet, so dass Wahrscheinlichkeitsverteilungen, Mittelwerte, Varianzen und Konfidenzintervalle der Ergebnisvariablen, wie z.B. der Sohländerung abgeleitet werden können. Beispielsweise wird die Varianz der Wassertiefe, abhängig von p_i unsicheren Eingangsparametern folgendermaßen berechnet:

$$Var(H_k) \approx \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (H_k(p_i) - \overline{H_k})^2 \quad (8)$$

Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass es keine Beschränkung bezüglich der Linearität des Systems, der Unabhängigkeit zwischen den Eingangsparametern oder der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Eingangsparameter gibt. Der große Nachteil liegt allerdings in der Anzahl der notwendigen Simulationen. Die Simulationszeit für die in der BAW in Projekten verwendeten FT-Modelle ist viel zu groß, als dass eine klassische Monte-Carlo Methode zur Anwendung kommen könnte.

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut SCAI wurde daher eine auf die Berechnung der Konfidenzintervalle spezialisierte MC Methode auf die Projektauglichkeit untersucht (Nikitina, Clees, 2009a; 2009b). Diese wird im folgenden MC-CL genannt und im Kapitel 2.3.1.3 näher erläutert. Es existieren weitere Techniken, um die Anzahl der Simulationsläufe unter Beibehaltung der Genauigkeit zu reduzieren (z.B. Latin Hypercube Sampling (Stein, 1987)).

2.3.1.3 Metamodellierung

Für stark nichtlineares Modellverhalten schlägt das Fraunhofer Institut SCAI eine mittels einer speziellen, durch RBF-Metamodellierung beschleunigten Monte-Carlo-basierten Zuverlässigkeitsmethode zur Berechnung der Konfidenzschranken (MC-CL) vor. Diese Methode erlaubt es, das Konfidenzintervall direkt und unabhängig von der Standardabweichung zu berechnen. Nur für den Fall nicht-verzerrter Normalverteilungen, also linearer Funktionen, stehen die Standardabweichung und das Konfidenzintervall in Beziehung zueinander. Für stark nichtlineare Funktionen sind die beiden nicht äquivalent, nicht proportional und stehen nicht einmal funktionell miteinander in Beziehung. Mit Hilfe der MC-CL Methode können die Konfidenzschranken approximativ bestimmt werden. Dafür wird die kumulative Verteilungsfunktion durch eine empirische kumulative Verteilungsfunktion ersetzt. Aus der empirischen Verteilungsfunktion können dann die Konfidenzschranken direkt abgelesen werden.

Die empirische Verteilungsfunktion nähert sich mit steigender Anzahl an Simulationen, also für steigend viel Datenmaterial zur statistischen Auswertung an die kumulative Verteilungs-

funktion an. Die inverse Funktion der Verteilungsfunktion ergibt die entsprechenden (approximativen) Konfidenzschranken. Wichtig ist dabei, dass die Werte der unsicheren Parameter zwar zufällig, aber sinnvoll verteilt sind, damit auch mit geringeren Anzahlen an Simulationen trotzdem statistische Aussagen getroffen werden können. Die Werte für die unsicheren Parameter werden mit einem eigenen Programm (Design of Experiment: DoE) generiert. Dabei muss eine andere Konfiguration gewählt werden, wenn die MC-CL Untersuchung zusätzlich durch Metamodellierung auf Basis von radialen Basisfunktionen unterstützt werden soll. Anhand einer kleinen Anzahl (etwa 50 – 100 Simulationen) wird ein Metamodell angelehrt, dass dann wiederum eine große Anzahl (1000 – 10000) Simulationen durchführt. Mit Hilfe der Metamodellierung können neben den Intervallschranken auch die resultierenden (approximierten) Verteilungsfunktionen ermittelt werden.

Für die Durchführung dieser Methode hat SCAI verschiedene Programme entwickelt, die eine einfache Anwendung ermöglichen und anhand eines Projektes am Rhein (Iffezheim – Speyer) getestet wurden (Kopmann, Brudy, 2011). Die Anwendung in der Projektarbeit ist trotzdem durch die immer noch recht hohen Anzahlen an Simulationen begrenzt.

2.3.2 Vergleich der Zuverlässigkeitsmethoden und Beispielanwendungen

Die in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Zuverlässigkeitsmethoden wurden sowohl auf Rinnenmodelle als auch auf Flussmodelle angewendet. Bei der Anwendung auf Rinnenmodelle ging es in erster Linie um den Vergleich der Zuverlässigkeitsmethoden. Bei der Anwendung auf Flussmodelle sollte der Nutzen für die Projektarbeit eingeschätzt werden. In Tabelle 3 sind die Anwendungen zusammengestellt.

Rinnenmodelle			
Beschreibung	verwendete Methoden	unsichere Parameter	Veröffentlichung
„bosse“ Validierungsbeispiel von Telemac, sinusförmige Düne, die sich unter gleichmäßiger Strömung fortbewegt (Sisyphé) (Sisyphé AD-manuell)	FOSM/AD von Hand MC vereinfacht	Sohlrauhheit, mittlerer Korndurchmesser, kritischer Shieldsparameter	(Kopmann, Schmidt 2008)
Einschnürungsrinne Laborrinne der BAW mit einer Einschnürung und beweglicher Kiessohle (Sisyphé) (Sisyphé AD-manuell)	FOSM/AD von Hand MC vereinfacht	Sohlrauhheit, mittlerer Korndurchmesser,	(Kopmann, Schmidt 2008)

Yen-Krümmen Labormodell mit 90° Krümmung und beweglicher Sandsohle, instationäre Ganglinie (Sisyphus) (Sisyphus-AD)	FOSM/AD MC-CL	Mittlerer Korndurchmesser, Rauheitsbeiwert, Sekundärströmungsparameter, Slope-Effekt Parameter	(Riehme et.al 2010)
Schönberg Labormodell der BAW mit Bühnen und leichter Krümmung (Telemac2D) (Telemac2D-AD)	FOSM/ND FOSM/AD MC	Rauheitsbeiwert für 2 Zonen	(Mai et.al 2015)
„bosse“ Validierungsbeispiel von Telemac, sinusförmige Düne, die sich unter gleichmäßiger Strömung fortbewegt (Sisyphus-AD)	Optimierung mit Gradienten aus AD	Automatische Kalibrierung von 92 Rauheitszonen	(Schäfer 2014) (Merkel et.al 2013a), (Merkel et.al 2013b)
Estimation Validierungsbeispiel von Telemac für die automatische Kalibrierung, gerade Rinne mit gleichförmiger Strömung (Telemac2D-AD)	Optimierung mit Gradienten aus AD	Automatische Kalibrierung des Rauheitsbeiwertes	(Schäfer 2014)
Einschnürungsrinne Laborrinne der BAW mit einer Einschnürung und beweglicher Kiessohle (Telemac2D-AD/Sisyphus-AD adjungierte Version)	Optimierung mit Gradienten aus AD	Automatische Kalibrierung von 3 Rauheitsbeiwerten	(Schäfer, 2014) (Kopmann, Schäfer, 2014)
Flussmodelle			
Beschreibung	verwendete Methoden	unsichere Parameter	Veröffentlichung
Mühlhamer Schleife 10 km Donauabschnitt, 9 Tage künstliche Ganglinie mit 2 Hochwässern (Telemac2D/Sisyphus)	FOSM/ND MC-CL	aktive Schichtdicke, Slope-Effekt Parameter, MPM-Vorfaktor, Sekundärströmungsparameter, Rauheitsbeiwert für	(Kopmann, Schmidt 2010)

		4 Zonen, mittlerer Korndurchmesser von 5 Klassen	
Mühlhamer Schleife 10 km Donauabschnitt 12 h mit stationären Randbedingungen (Sisyphé) (Sisyphé-AD)	FOSM/AD MC-CL	aktive Schichtdicke, Slope-Effekt Parameter, MPM-Vorfaktor, Sekundärströmungsparameter, Rauheitsbeiwert für 4 Zonen, mittlerer Korndurchmesser von 5 Klassen	(Riehme et.al 2010)
Iffezheim-Speyer 40km Rheinabschnitt, 10 Jahre natürliche Ganglinie (Telemac2D/Sisyphé/DredgeSim)	FOSM/ND MC-CL Metamodell,	aktive Schichtdicke, MPM-Vorfaktor, Slope-Effekt Parameter, mittlerer Korndurchmesser Sohle, mittlerer Korndurchmesser Zugabematerial, Rauheitsbeiwert für 3 Zonen,	(Kopmann, Brudy 2011)
GSZMN 10km Rheinabschnitt, 25 Tage künstliche Ganglinie mit Hochwasser (Telemac2D/Sisyphé) (Telemac2D-AD/Sisyphé-AD)	FOSM/ND FOSM/AD MC	Rauheitsbeiwert für 5 Zonen, mittlerer Korndurchmesser von 10 Klassen	(Mai et.al 2015)
Donau Validierungsbeispiel von Telemac, 8km Donauabschnitt (Telemac2D-AD adjungierte Version)	Verwendung der Adjungierten	Verfolgung der Abhängigkeiten der Schubspannung in einem Kolk	(Merkel et.al 2013a), (Merkel et.al 2013b)

Tabelle 3: Übersicht der Anwendungen der Zuverlässigkeitsmethoden

Bei den Vergleichen zwischen den linearen und den nicht-linearen Methoden hat sich die Erfahrung der Modellierer bestätigt, dass vor allem für stationäre Zustände die untersuchten unsicheren Parameter auf Wasserspiegel oder Sohländerungen einen weitgehend linearen Einfluss haben. Die Abweichung zwischen den Methoden ist in vielen Fällen vernachlässigbar. Bei langen morphodynamischen Simulationen allerdings, berechnet die lineare Methode nur etwa im ersten halben Jahr ähnliche Ergebnisse, wie die nicht-lineare Methode (siehe

Anwendungsbeispiel Iffezheim-Speyer (Kopmann, Brudy 2011)). Anschließend werden deutlich größere Konfidenzintervalle prognostiziert. Trotzdem bleibt das generelle Verhalten ähnlich. D.h. Zeiten mit größeren und kleineren Unsicherheiten werden von beiden Methoden gleichermaßen vorhergesagt. Auch die räumlichen Bereiche mit sicheren bzw. unsicheren Vorhersagen stimmen bei beiden Methoden überein. Lediglich die quantitativen Aussagen sollte man bei den linearen Methoden bei langen Simulationszeiträumen nicht verwenden.

Die Zuverlässigkeitsmethoden erlauben in der Projektarbeit weitere Interpretationen der Simulationsergebnisse, die so hilfreich sein können, dass sich der dadurch entstehende Mehraufwand lohnt. Die bisher oft verwendeten minimalen und maximalen Abschätzungen oder Sensitivitätsbetrachtungen können durch den Einsatz von Statistik weiter generalisiert werden. Anstelle eines Ergebnisses (oder einer Angabe einzelner Extremwerte) kann ein Konfidenzintervall verknüpft mit einer Wahrscheinlichkeit berechnet werden. Diese Angaben sind nicht immer intuitiv erfassbar und bedürfen verstärkter Erklärung. Aus den Projektanwendungen konnten bisher folgende generelle Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Zonen mit hohen Unsicherheiten (großen Konfidenzintervallen) entsprechen oft physikalisch labilen Situationen (z.B. Furten, deren Lage nicht eindeutig festgelegt ist)
- Zonen mit hohen Unsicherheiten zeigen sich auch bei numerisch schwierigen Bereichen (z.B. flach überströmte Bühnen oder andere nass-trocken Problematiken)
- Die sensitivsten Parameter in typischen Flussmodellierungen sind die Rauheitsbeiwerte im Flussschlauch und die mittleren Korngrößen der beweglichen Sedimentklassen. Die Sedimentklassen, die nahe dem mittleren Korndurchmesser der Sedimentmischung liegen, sind maßgeblich für die Evolution und damit auch am sensitivsten.
- Die Konfidenzintervalle nehmen zunächst linear mit der Simulationszeit zu. Da die Flussmorphologie aber ein selbstregulierender Prozess ist, steigen die Unsicherheiten nicht ins Unendliche, sondern stagnieren auf einem Niveau bzw. können auch wieder abnehmen.
- Die Größe der Konfidenzintervalle infolge unsicherer Rauheiten hat eine klare Korrelation zur Ganglinie. Bei abnehmendem Durchfluss verkleinern sich auch die Konfidenzintervalle signifikant. Diese Korrelation ist bei den Konfidenzintervallen infolge unsicherer Korngrößen nicht gegeben.
- Gebiete mit Baggerungen zur Erhalt der Fahrrinne weisen (logischerweise) eine geringe Unsicherheit bzgl. der Sohlage auf. Verklappungsbereiche hingegen eine sehr hohe, da hier die Differenzen aus großen Baggerungsgebieten punktuell eingebracht werden. Für statistische Aussagen über Konfidenzintervalle von mittleren Sohlagen sollten daher Bagger- und Verklappbereiche ausgenommen werden.
- Hochwasserereignisse haben eine höhere Unsicherheit als Niedrigwasserperioden.

- Die Verringerung von Konfidenzintervallen ist deutlich langsamer als die Zunahme (z.B. bei Hochwasser).

Die algorithmische Differentiation hat den großen Vorteil, dass nur 1 Simulation benötigt wird für jeden unsicheren Parameter und sich damit zu einer sehr geringen Rechenzeit ergibt und sich aber auch das Postprocessing vor allem gegenüber MC deutlich reduziert. Das macht es sehr einfach für die Einbindung in die Projektarbeit. Problematisch ist allerdings, dass nicht alle Stellen im Programm differenzierbar sind. Dadurch kommt es zu Instabilitäten bei der Berechnung der Tangenten, was dann irgendwann zum Abbruch führt. Die reine hydrodynamische Anwendung läuft deutlich stabiler. Dort gibt es nur beim Trockenfallen / Benetzen das Problem der Schwellwerte. Bei der morphodynamischen Simulation kommen noch Schwellwerte bei den Transportformeln (z.B. bei der in der BAW derzeit am häufigsten eingesetzten Transportformel von Meyer-Peter und Müller) und die nicht-erodierbare Sohle hinzu. Eine genaue Untersuchung und Lösung des Problems war im Rahmen des FuE-Vorhabens nicht mehr möglich. Um trotzdem zu Ergebnissen zu kommen, wurden die Tangenten für die neuesten Untersuchungen (Mai et al.) vorsichtig gedämpft. Für das Schönberg Beispiel konnte trotz der Dämpfung eine hervorragende Übereinstimmung zu den anderen Methoden erreicht werden. Bei dem Rheinbeispiel war dies noch nicht der Fall.

2.4 Weiterentwicklung bestehender FT-Programme

Im Rahmen dieses Projektes wurden drei größere Weiterentwicklungen an dem Sedimenttransportmodul des TELEMAC-Systems vorgenommen. Diese erfolgten vorrangig in Zusammenarbeit mit Universitäten.

2.4.1 Berücksichtigung von turbulenzinduziertem Geschiebetransport

Während der Untersuchungen an der Einschnürungsrinne konnte deutlich der Zusammenhang zwischen turbulenter Strömung und Sedimenttransport beobachtet werden. In dem sehr turbulenten Bereich der Einschnürung kam es durch „Turbulenzballen“ zu beginnendem bzw. vermehrtem Geschiebetransport. Da die Ergebnisse der numerischen Modellierung nicht vollständig zufriedenstellend waren, wurden zwei Aufträge an das Leichtweiß-Institut für Wasserbau Braunschweig mit vertiefenden Untersuchungen vergeben.

Zunächst sollten die Grundlagen zur Entwicklung eines Ansatzes zur expliziten Berücksichtigung von Turbulenz in der Feststofftransportmodellierung untersucht werden. Darin enthalten war eine Zusammenstellung der theoretischen Grundlagen zur Relevanz des Turbulenzeinflusses auf Sohlschubspannungen, sowie eine Literaturrecherche nach bereits vorhandenen Ansätzen und die Bewertung der vorhandenen Ansätze. In dem Abschlussbericht (Dittrich, Marek 2002) wird zusammengefasst, dass zufriedenstellende Feststofftransportmodellierung eine genaue Erfassung der Hydrodynamik inklusive des turbulenten Strömungsfeldes

beinhaltet, das Sohlmaterial und die Sohlstrukturen berücksichtigt werden müssen und die Wechselwirkung zwischen Strömung und Sohle erfasst werden müssen. Des Weiteren werden konkrete Hinweise zu der Wahl des Turbulenzmodells gegeben. Es werden Zweigleichungsmodelle favorisiert, wobei bei Separationsströmungen in Kombination mit rauen Oberflächen das $k\omega$ -Modell anstelle von $k\varepsilon$ -Modell empfohlen wird. Bei der Verwendung des $k\varepsilon$ -Modells sollte der Parameter c_{μ} nicht konstant, sondern als Funktion von Produktion und Dissipation angenommen werden. Dieser Empfehlung wurde bislang nicht gefolgt, daher sind entsprechende Untersuchungen z.B. im Referat Numerische Verfahren im Wasserbau angeraten.

Die Autoren bevorzugen eine Berechnung der Schubspannungen aus der kinetischen Energie und nicht aus dem logarithmischen Geschwindigkeitsprofil. Allerdings haben weitere Untersuchungen gezeigt, dass zumindest für den zweidimensional tiefengemittelten Fall, sich keine Unterschiede der beiden Ansätze ergeben. Ansätze zur Schubspannungsberechnung, die das momentane turbulente Geschwindigkeitsfeld berücksichtigen, konnten nicht gefunden werden. In dem BAW FuE-Projekt „Numerische Modellierung von Transportkörpern (Dünen) in Binnenwasserstraßen“ wurde inzwischen ein entsprechender Ansatz entwickelt und an Dünenströmungen erfolgreich getestet. Die auf dem Thema des FuE-Projektes entstandene Promotion wird in 2016 fertiggestellt.

In einem zweiten Auftrag wurde ein Ansatz zur Parametrisierung von turbulenzinduziertem Geschiebetransport in 2D-Modellen entwickelt (siehe Dittrich, Marek 2006). Die zweidimensionalen numerischen Feststofftransportberechnungen der Einschnürungsrinne und des Schönbergmodells sollten dadurch weiter verbessert werden. Dabei wurde zum einen ein alternatives FT-Programm verwendet, um Telemac spezifische Fehlerquellen auszuschließen. Weiterhin wurden verschiedene Turbulenzmodelle ($k\varepsilon$ -Modell und $k\omega$ -Modell), zwei- und dreidimensionale Berechnungen, unterschiedlich hoch aufgelöste horizontale Diskretisierungen und zwei Ansätze zur Berechnung der Sohlschubspannungen untersucht. Dabei zeigte sich, dass insbesondere für die Einschnürungsrinne die Verwendung eines Zweigleichungsmodells deutliche Verbesserungen der Hydrodynamik gegenüber dem Elder-Ansatz ergaben. Beide Programme erzielten mit dem $k\varepsilon$ -Modell vergleichbare Ergebnisse, was eine Validierung des in Telemac bis dahin in der BAW nur selten eingesetzten $k\varepsilon$ -Modells bedeutete. Die von der BAW ursprünglich angenommene horizontale Diskretisierung erwies sich als ausreichend.

Die dreidimensionalen hydrodynamischen Simulationen mit Zweigleichungsmodellen für die Turbulenz zeigten für beide Modelle sehr gute Übereinstimmungen mit den Messergebnissen. Daher empfehlen die Autoren die dreidimensionale numerische Simulation des Feststofftransportes für die beiden Anwendungsfälle. Da bei Verwendung von Zweigleichungsmodellen die zweidimensionalen Ergebnisse die tiefengemittelten Geschwindigkeiten gut abbilden konnten, ergab sich keine Verbesserung durch Dispersionsansätze. Die Berechnung der Sohlschubspannungen aus der kinetischen Energie in den tiefengemittelten Simu-

lationen ergab keine physikalisch sinnvollen Ergebnisse. In anderen Untersuchungen konnte dies nicht bestätigt werden. Vielmehr waren die Schubspannungen aus tiefengemittelter Geschwindigkeit bzw. tiefengemittelter kinetischer Energie vergleichbar. Weitere Verbesserungen der Feststofftransportmodellierungen der beiden Anwendungsbeispiele konnten in diesem Auftrag nicht erzielt werden.

Die Berücksichtigung von Turbulenz in der Feststofftransportmodellierung ist nicht abgeschlossen. Einige Erkenntnisse konnten in dem oben bereits erwähnten BAW FuE-Projekt gewonnen werden. Systematische Vergleiche der turbulenten Schwankungen zwischen Rinnenversuchen und numerischen Simulationen sollten durchgeführt. Dafür wurde ein Matlab-Skript entwickelt, welches die Berechnung der turbulenten kinetischen Energie aus Geschwindigkeitsmessungen vereinfachen soll (Kallenberg, 2014).

2.4.2 Entwicklung eines neuen Mehrschichtmodells

Aus der Projektarbeit und Zuverlässigkeitsanalysen im Rahmen dieses Forschungsprojektes war bekannt, dass neben der Wahl des Korndurchmessers der Aufbau und vor allem die Mächtigkeit der ersten Sedimentschicht einen maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Feststofftransportmodellierung haben. In Kooperation mit der EDF wurde das Ingenieurbüro Merkel daher beauftragt, für Telemac ein neues Mehrschichtmodell zu entwickeln, zu implementieren und zu testen (Merkel, Kopmann, 2011; Merkel, Kopmann, 2012a; Merkel, Kopmann, 2012b; Merkel 2012). Das Konzept des in Telemac verwendeten Mehrschichtmodells geht auf Hirano (1971) mit Weiterentwicklungen von Ribberink (1987) und anderen Wissenschaftsgruppen zurück. Merkel fand einige Limitierungen in dem klassischen Konzept und seiner Umsetzung in Telemac. Dazu zählt die Begrenzung der Schichtanzahl auf neun. Kritischer ist die numerisch bedingte zu starke Durchmischung. Nicht nur die erste, aktive Schicht, sondern auch die darunterliegende, das aktive Stratum werden durchmischt. Erosion und Sedimentation pro Zeitschritt sind durch die Kopplung zur Hydrodynamik in einem Zeitschritt sehr klein. Das verhindert bei typischen Schichtdicken den Aufbau von neuen Schichtungen, da pro Zeitschritt über die gesamte aktive Schicht gemittelt wird.

Merkel entwickelte ein neues Mehrschichtmodell CVSM (continuous vertical sorting model), in welchem die Durchmischung in der aktiven Schicht besser steuerbar ist. In dem Ansatz wird der Schichtaufbau separat und hoch aufgelöst gespeichert. Die Anzahl der Schichten wird durch einen modifizierten Douglas-Peucker-Algorithmus nahezu ohne Genauigkeitsverlust ausgedünnt. Das Konzept der aktiven Schicht bleibt weiterhin erhalten. Vor jedem Zeitschritt wird aus dem kontinuierlichen Profil eine mittlere Kornzusammensetzung der aktiven Schicht berechnet. Für die Mächtigkeit der aktiven Schicht wurden fünf verschiedene Algorithmen implementiert und getestet. Insbesondere die Berechnung nach Malcherek (2003) zeigte vielversprechende Ergebnisse. Nach einem Zeitschritt werden die resultierenden Sedimentationen als kleine Schicht oben auf das bestehende Profil angefügt, wohingegen Erosion aus dem Profil entnommen wird. Das neue Modell wurde an drei Laborrinnen getestet (Blom et al, 2003; Viparelli, et al 2010; Günter, 1971). In einer Masterarbeit wurde der

neue Ansatz anhand der Abpflasterungsversuche von Günter (Günter, 1971) weiter validiert (Anleu, 2012). Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass das neue Mehrschichtmodell im Vergleich zum klassischen Hirano Ansatz vergleichbare oder leicht bessere Ergebnisse erzielt. Der Vorteil des Mehrschichtmodells liegt darin, dass es deutlich weniger sensitiv gegenüber den Eingangsparametern ist und nicht nur bei optimal kalibrierten Parametern ein akzeptables Ergebnis erreicht. Das ist insbesondere dann von großem Wert, wenn keine Messdaten zur Kalibrierung oder Validierung zur Verfügung stehen.

Die Implementierung des neuen Mehrschichtmodells fand Eingang in die offizielle Telemac-Version. Allerdings stehen für einen reibungslosen Einsatz in der Projektarbeit noch zu wenige Erfahrungen mit dem neuen Ansatz zur Verfügung. Daher wurde außerhalb dieses Projektes ein Auftrag an das Ingenieurbüro Merkel gegeben, das anhand von zwei Projektbeispielen den Einsatz des neuen Mehrschichtmodells zeigt und mit dem herkömmlichen Ansatz vergleicht. Der Bericht wird in 2016 erwartet.

2.4.3 Weiterentwicklung des Sekundärströmungsansatzes

Die Telemac Versionen bis V5P5 enthalten keine Parametrisierung für den Einfluss von Krümmungen auf den Geschiebetransport. Dadurch konnten typische Krümmungsprofile mit Prall- und Gleithang nicht modelliert werden. Im Rahmen dieses Projektes wurde ein einfacher Sekundärströmungsansatz implementiert (Kopmann, 2006), der dann in die offizielle Telemac-Version übernommen wurde. Der auf Engelund (1974) zurückgehende Ansatz schätzt aufgrund der Krümmung die veränderte Richtung des Sedimenttransportes. Da die Krümmung in einem zweidimensionalen Modell nicht direkt bekannt ist, wurde diese aus dem Wasserspiegelneigung abgeschätzt. Dabei bleibt die tiefengemittelte Strömungsberechnung unangetastet. Es wird lediglich die Transportrichtung des Geschiebes angepasst. Mit Hilfe eines Parameters wird verschieden rauen Sohlen Rechnung getragen.

In dem BAW-Forschungsvorhaben „Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte und Transportphänomene in morphodynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen“ wurde der Ansatz von Riesterer (IWG, 2014; Riesterer et al 2015) erweitert. In den Laborversuchen (siehe Kapitel 2.2.1) zeigte sich, dass sich der Einfluss der Sekundärströmung auf die Sohle räumlich verzögert einstellt. Mit Hilfe einer Anpassungslänge, analog zum „loading law“-Ansatz konnten die zweidimensionalen Ergebnisse für den Laborversuch weiter verbessert werden. Allerdings konnte mit dem neuen Ansatz für stark gekrümmte Wasserstraßen (mittlerer Niederrhein bei Düsseldorf) keine Verbesserung erzielt werden. Da die Modellierung der freien Oberfläche mit Telemac nicht immer glatte Ergebnisse erzielt, wurde ebenfalls von Riesterer für den Sekundärströmungsansatz die Krümmung direkt verwendet. Diese muss dann vom Modellierer aus der Geometrie der Flussachse ermittelt werden und als Anfangsbedingung dem Modell vorgegeben werden.

3 Empfehlungen und Ausblick

Bei vielen durch die BAW durchgeführten Untersuchungen zur Wirkungsweise flussbaulicher Maßnahmen muss die morphodynamische Flussentwicklung einbezogen werden. In diesem FuE-Projekt hat sich gezeigt, dass mehrdimensionale numerische Feststofftransportmodelle (FT-Modelle) für viele Fragestellungen der morphodynamischen Flussentwicklung effizient einsetzbar sind. Gegenüber numerischen eindimensionalen FT-Modellen haben sie den Vorteil auch innerhalb des Flussquerschnittes zu differenzieren. Dieser Vorteil wird durch einen erheblichen Mehraufwand an Rechenzeiten erkauft. Durch die Nutzung von Hochleistungscomputern und parallelisierten Programmen wird diesem Nachteil entgegen gewirkt. Im Vergleich zu gegenständlichen Modellen mit beweglicher Sohle kann die Geometrie schneller an verschiedene Varianten angepasst werden. Gerade bei Langzeitprognosen für morphologischen Fragestellungen, die eine erhebliche Unschärfe aufgrund der langen Vorhersagezeiträume und der komplexen Prozesse aufweisen, sind Szenarienrechnungen sehr hilfreich und tragen zur Verbesserung der Bewertung von Maßnahmen und deren Qualitätskontrolle bei. Als Ergänzung zu Naturuntersuchungen und gegenständlichen Modellen sind mehrdimensionale FT-Modelle optimal geeignet, die räumliche und zeitliche Wirkung vieler verschiedener Einflussgrößen mittels Szenarienrechnungen aufzuzeigen.

In einigen Fragestellungen kann durch das komplexe Zusammenwirken von Hydrodynamik und Morphodynamik nicht ausgeschlossen werden, dass die für die Modellierung notwendigen Abstraktionen das Ergebnis signifikant beeinflussen. Der Entwicklungsstand der mathematischen Abbildung für eine prognosesichere Aussage ist für diese Fälle nicht ausreichend. Auch gegenständliche Modelle können an die Grenzen der Prognosefähigkeit stoßen. Daher empfiehlt es sich, bei entsprechenden Fragestellungen nicht einem Modell zu vertrauen, sondern wenn möglich, die Vorteile aus verschiedenen Modelltypen – numerisch ein- und mehrdimensional, sowie gegenständliche Modelle – zu kombinieren. Im günstigsten Fall werden die Modelltypen sich gegenseitig bestätigen. Andernfalls zeigt die Streuung der Ergebnisse den Unsicherheitsbereich auf.

Während des FuE-Projektes wurden sehr gute Erfahrungen gemacht, Rinnenversuche mit numerischen Modellen zu begleiten. An der BAW gibt es ein regelmäßiges Treffen der entsprechenden Bearbeiter von gegenständlichen und numerischen Modellen. Dadurch wird die ständige Validierung der verwendeten FT-Verfahren, sowie die kontinuierliche Verbesserung bzw. Erstellung von Validierungsdatensätzen gewährleistet. Diese enge Zusammenarbeit soll unbedingt aufrechterhalten bleiben.

Neben der Validierung an eigenen Datensätzen wurden auch Datensätze aus der Literatur verwendet. Dabei hat sich gezeigt, dass die Qualität und Quantität der veröffentlichten Daten oft deutlich hinter den in der BAW erhobenen Daten zurücksteht. Die Validierungsdatensätze aus den BAW-eigenen Rinnenversuchen wurden auf Anfrage an Universitäten weitergege-

ben. Daraus ergab sich ohne großen Aufwand ein Vergleich zwischen verschiedenen FT-Verfahren (siehe Kapitel 2.1.1) für BAW-relevanten Fragestellungen. Darüber hinaus wurden die eingesetzten FT-Verfahren auch an Literaturbeispielen validiert. Die gemachten Erfahrungen bestätigen die Vorgehensweise der BAW, eigene Rinnenversuche zu betreiben und Messdaten mit Universitäten und Institutionen auszutauschen. Es hat sich gezeigt, dass Kooperationen, wie sie mit Deltares (Niederlande), mit der Electricité de France (EDF, Frankreich), mit der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH, Schweiz) und mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) bestehen, erheblich zur Verbesserung der eingesetzten FT-Verfahren beitragen. Durch die Bearbeitung von gleichen Validierungsbeispielen an den Institutionen aus den Bereichen analytische Lösungen, Laborexperimente und Flussanwendungen mit dem jeweiligen FT-Programm können effiziente und qualitativ hochwertige Verfahrensvergleiche durchgeführt werden. Dadurch können die FT-Programme besser bewertet und zielgerichtet weiterentwickelt werden. Beides erhöht die wissenschaftliche Akzeptanz der FT-Programme und verbessert ihre Prognosefähigkeit.

Ein erheblicher Teil der Arbeit in diesem Forschungsprojekt ging in die Untersuchung und Anwendung von Zuverlässigkeitsmethoden. Es wurden verschiedene Methoden untersucht und sowohl an Rinnenmodellen als auch an Projektbeispielen angewendet. Es stehen nun ein theoretisches Gerüst und praktische Vorgehensweisen sowie Software zur Verfügung, um Aussagen zu Sensitivitäten von Eingangsparametern und den zugehörigen Konfidenzintervallen und Prognosewahrscheinlichkeiten zu treffen. Diese Vorgehensweisen sollten in der praktischen Projektarbeit der BAW Eingang finden. Derzeit wird in der BAW ein Modellierungsleitfaden erstellt, in dem die in diesem FuE-Projekt bewährten Vorgehensweisen für Projektbeispiele schriftlich niedergelegt werden sollten. Dadurch kann die Einführung von Zuverlässigkeitsmethoden in die Projektarbeit der BAW sichergestellt werden.

Mit den untersuchten Tools sind neben Zuverlässigkeitsanalysen auch Optimierungen, wie beispielsweise eine automatische Kalibrierung möglich. Für eine praktische Verwendung dieser Optimierungsverfahren in der Projektarbeit sind noch weitere Untersuchungen notwendig. In der bestehenden Zusammenarbeit mit dem Telemac-Konsortium werden diese Arbeiten fortgeführt.

Die mehrdimensionale FT-Modellierung gehört noch nicht zum Stand der Technik. So ist es nicht verwunderlich, dass die Untersuchung der Prognosefähigkeit trotz der langen Laufzeit des Projektes nicht als abgeschlossen bezeichnet werden kann. Drei konkrete Aufgabenpakete konnten in diesem Projekt nicht mehr realisiert werden, werden aber nach wie vor als zielführend für die Verbesserung der Prognosefähigkeit der FT-Programme in der BAW angesehen. Dazu gehören eine verbesserte Implementierung des Ungleichgewichtstransportes (siehe Kapitel 2.1.1), die Untersuchung eines variablen Vorfaktors im k_ε -Modell (siehe Kapitel 2.4.1) und weitere Vergleiche zwischen gemessener und numerisch berechneter kinetischer Energie und Dissipation (siehe Kapitel 2.4.1). Darüber hinaus ist die Weiterent-

wicklung der FT-Programme sowie ihre ständige Validierung eine Daueraufgabe der Wissenschaft und sollte auch in der BAW weiterhin betrieben werden. Diese Empfehlung findet sich auch im Fachkonzept (2013, Kapitel 3.6.1) des Referates Numerische Verfahren im Wasserbau (W5).

4 Publikationen

Im Folgenden sind alle Berichte und Veröffentlichungen chronologisch aufgelistet, die im direkten Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt entstanden sind. Die genauen Referenzen sind dem Literaturverzeichnis zu entnehmen.

Berichte von externen Auftragnehmern:

- Grundlagen zur Entwicklung eines Ansatzes zur expliziten Berücksichtigung von Turbulenz in der Feststofftransportmodellierung (Dittrich, Marek, 2002)
- Entwicklung eines Ansatzes zur Parametrisierung von turbulenzinduziertem Geschiebetransport in 2D-Modellen (Dittrich, Marek, 2006)
- Literaturstudie zu morphologischen Rinnenversuchen (Schankat, Wieprecht, 2006).
- Validierung des Programms SediMorph anhand ausgewählter morphologischer Rinnenversuche (Westfahl 2007)
- Literaturstudie zu Langzeitstrategien für morphodynamische Modelle (Gebler, Wieprecht, 2008)
- Morphodynamische Modellierungen mit dem Programm Sisyphe von geplanten Versuchen in der Flussbauversuchsrinne (Rátky 2008)
- Studie zur Zuverlässigkeitsanalyse morphodynamischer Modelle. Abschlussbericht zum Arbeitspaket (WP) 1 (Nikitina et al 2008)
- Fallstudie für die Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Methode MC-CL. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 2.1 (Nikitina, Clees, 2009a)
- Entwicklung der Softwaretools CLcomp und DoE. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 2.2 (Nikitina, Clees, 2009b)
- Zuverlässigkeitsanalyse für stark nichtlineare Funktionen $y(x)$ mittels einer speziellen, durch RBF-Metamodellierung beschleunigten Monte-Carlo-basierten Methode zur CL-Berechnung. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 2.3 (Nikitina et al 2010)
- Uncertainty quantification based on forward sensitivity analysis in Sisyphe (Riehme et al 2010)
- Final Report to Contract BAW 2010-08-09 "Vereinfachung der Installation von DredgeSim und Verbesserung des Sekundärströmungsansatzes und des Ansatz des gravitationellen Transports" (Merkel 2010)
- Validation of SISYPHE V6P0 with 2 flume experiments (Merkel 2011)

- Report #3. 3 zum Vertrag "Validierung und Verbesserungen des morphodynamischen Moduls Sisyphe" (Merkel 2012)
- dco/fortran: User Guide, AD-enabled NAG Fortran compiler: User Guide (Naumann, NAG, 2015)
- Userguide : AD-Telemac2d v6p2. Unterstützung der Lösung hochdimensionaler nichtlinearer Optimierungsprobleme im Wasserbau mittels adjungierter Versionen von Sisyphe / Telemac (Riehme, Naumann, 2015)

Interne Berichte:

- Kurzbericht zur Implementierung eines Ansatzes zur Berücksichtigung von Sekundärströmung in Betrag und Richtung der Schubspannung (Kopmann 2006)
- BAW-Bericht Morphologische Versuche an einer Rinne mit Einschnürung, Mittel- bis Feinkiessohle (BAW 2007)
- BAW-Bericht Morphologische Versuche an einer Rinne mit Einschnürung, Sohle aus Grobsand (BAW 2011)
- Berechnung der turbulenten kinetischen Energie aus Geschwindigkeitsmessungen. (Kallenberg 2014)

Veröffentlichungen:

- Reliability analysis of two-dimensional morphodynamic results (Kopmann, Schmidt, 2008)
- Comparison of different reliability analysis methods for a 2D morphodynamic numerical model of River Danube (Kopmann, Schmidt, 2010)
- A continuous sediment layer concept for Sisyphe (Merkel, Kopmann, 2011)
- Numerical modelling of bed formes (dunes) with TELEMAC3D and SISYPHE (Goll et.al 2011)
- Numerical simulations of groyne influenced dunes (Goll, Kopmann, 2012a)
- Dune simulation with TELEMAC3D and SISYPHE: A parameter study (Goll, Kopmann, 2012b)
- Using Reliability Analysis in Morphodynamic Simulation with TELEMAC-2D / SISYPHE (Kopmann et.al 2012)
- Using Reliability Analysis in Morphodynamic Simulation with TELEMAC-2D / SISYPHE (Kopmann et.al 2012)
- Continuous Vertical Grain Sorting for TELEMAC & SISYPHE v6p2 (Merkel, Kopmann, 2012a)
- A continuous vertical grain sorting model for Telemac & Sisyphe (Merkel, Kopmann, 2012b)
- Drei Jahre Telemac Open Source (Kopmann, Merkel, 2013)

- Numerical Modelling of flumes with moving dunes – TELEMAC3D and Sisyphe (Goll et.al 2013)
- Kontinuierliche Validierung hydrodynamischer und morphodynamischer Modelle mit physikalischen Modellversuchen (Goll et.al 2013)
- Einsatz eines innovativen Untergrundmodells für die Feststofftransportmodellierung (Merkel, Kopmann, 2014)
- Using Algorithmic Differentiation for uncertainty analysis (Mai et.al 2015)
- First-order Uncertainty Analysis using Algorithmic Differentiation of the Telemac-2D/Sisyphe morphodynamic model (Villaret et.al 2016)

Betreute studentische Arbeiten:

- Multidimensional numerical bed-load transport modelling of a physical model with groynes (Schönberg) (Nzokou Tanekou 2002)
- Langfristige mehrdimensionale Feststofftransportmodellierung zum morphologischen Gleichgewichtszustand anhand von Modellversuchen und einer Renaturierungsmaßnahme an der Enz (Imiela 2003)
- Reliability of the morphodynamic model „SISYPHE“ (Papazzoni 2005)
- Modellierung von Geschiebezugaben am Niederrhein bei Wesel mit einem 2D-tiefengemittelten morphologischen Modell (Rátky 2006).
- Numerische Modellierung von Geschiebetransport durch Dünen (Goll 2011)
- Hydro-morphodynamic modelling using a coarse 2D model in comparison to results from a 1D model for a 70km long Odra stretch (Sadid 2013)
- Erprobung von Optimierungsalgorithmen für die Kalibrierung eines Finite-Elemente Strömungsmodells auf Basis von Gradienten (Schäfer 2014)
- Application of reliability analysis methods to a numerical model of river Rhine (Mai 2015)

5 Literatur

Anleu F., R. (2012). Validation of a New Vertical Sorting Model and Sediment Transport Approach in the Sisyphe Module of the TELEMAC Software, on the Basis of Laboratory Models with Multigrain Sediment. Masterarbeit Karlsruher Institut für Technologie.

Ayboga, E. (2002). Morphodynamisch-numerische Modellierung eines physikalischen Modellversuchs in der BAW zur Knickbuhne. Vertieferarbeit an der TU Darmstadt.

- BAW (2002). BAW-Bericht Monte-Carlo-Simulationen zur Ermittlung der Prognosefähigkeit von eindimensionalen Hec6-Modellen mit beweglicher Sohle (Elbe-Torgau). Bericht-Auftrags-Nr. 0.00.08167.00 Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
- BAW (2007). BAW-Bericht Morphologische Versuche an einer Rinne mit Einschnürung, Mittel- bis Feinkiessohle. Bericht-Auftrags-Nr. A39530110064, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
- BAW (2011). BAW-Bericht Morphologische Versuche an einer Rinne mit Einschnürung, Sohle aus Grobsand. Bericht-Auftrags-Nr. A39530110064-02, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
- BAW (2013). Fachkonzept des Referats W5 Numerische Verfahren im Wasserbau. Version 1.0. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
- Baron, M. (2013). Kalibrierung und Validierung der numerischen Verfahren Telemac und UnTRIM anhand einer Laborrinne. Abschlussbericht zum BAW Auftrag „Begleitende mehrdimensionale numerische Modellierung von Rinnenversuche“.
- Baron, M., Patzwahl, R. (2013). Influence of Numerical Schemes in Representing Flow Over and Around Groynes. Proceedings of the 20th Telemac and Mascaret User Club, 16 - 18 October 2013, BAW Karlsruhe.
- Barros, E. (1996). Estimation de paramètres dans les équations de Saint-Venant. Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI). Spécialité Mathématiques Appliquées.
- Beck, M. B. (1987). Water Quality Modeling: A Review of the Analysis of Uncertainty. Water Resources Research, Vol. 23, Nr. 8, pp. 1393 – 1442.
- Bernini, A., Caleffi, V., Valiani, A. (2009). Numerical Modelling of Alternate Bars in Shallow Channels. In: Braided Rivers: Process, Deposits, Ecology and Management. Ed. Smith G.H.S., Best, J.L., Bristow, C.S., Petts, G.E. DOI: 10.1002/9781444304374.ch7
- Bihs, H. und Olsen, N.R.B. (2007). Three-Dimensional Numerical Modeling of Contraction Scour. 32nd IAHR Congress. Venice, Italy
- Bihs, H. (2010). Numerical investigation of free surface flow in a channel with a long contraction. Tagungsband Riverflow Braunschweig.
- Blom, A., Ribberink, J.S., de Vriend, H.J. (2003). Vertical sorting in bed forms. Flume experiments with a natural and a tri-modal sediment mixture. Water Resources Research, Vol. 39, No. 2.
- Casulli V, Zanolli P. (2002). Semi-implicit numerical modelling of non-hydrostatic free-surface flows for environmental problems. Mathematical and Computer Modelling 2002; 36:1131–1149.
- Damgaard, J., Soulsby, R., Peet, A., Wright, S. (2003). Sand Transport on Steeply Sloping Plane and Rippled Beds. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 129, No. 9 pp. 706-719.

Dittrich, A., Marek, M. (2002). Grundlagen zur Entwicklung eines Ansatzes zur expliziten Berücksichtigung von Turbulenz in der Feststofftransportmodellierung. Bericht Nr. 884 Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Universität Braunschweig.

Dittrich, A., Marek, M. (2006). Entwicklung eines Ansatzes zur Parametrisierung von turbulenzinduziertem Geschiebetransport in 2D-Modellen. Bericht Nr. 903. Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Universität Braunschweig.

Engelund, F. (1974). Flow and Bed Topography in Channel Bends. Journal of the Hydraulics Division. Vol.100, No. HY11, 197.

Flemming, B.W. (1988). Zur Klassifikation subaquatischer, strömungstransversaler Transportkörper. Bochumer geologische und geotechnische Arbeiten. 29:44–47

Gaudio, R., Marion, A. (2003). Time evolution of scouring downstream of bed sills. Journal of Hydraulic Research. Vol. 41 No. 3 pp. 271–284.

Gebler, T., Wieprecht, S. (2008). Literaturstudie zu Langzeitstrategien für morphodynamische Modelle. Technischer Bericht Nr. 04/2008. Institut für Wasserbau Universität Stuttgart.

Goll, A. (2011). Numerische Modellierung von Geschiebetransport durch Dünen. Diplomarbeit, BAW und Universität Stuttgart.

Goll, A., Kopmann, R., Brudy-Zippelius, T. (2011). Numerical modelling of bed formes (dunes) with TELEMAC3D and SISYPHE. Proceedings of the 18th Telemac and Mascaret User Club, 17 - 19 October 2011, EDF Chatou.

Goll, A., Kopmann, R. (2012a). Numerical simulations of groyne influenced dunes. Proceedings of River Flow 2012, San José, Costa Rica. CRC Press.

Goll, A., Kopmann, R. (2012b). Dune simulation with TELEMAC3D and SISYPHE: A parameter study. Proceedings of the 19th Telemac and Mascaret User Club, 17 - 19 October 2012, HRW Oxford.

Goll, A., Kopmann, R., Villaret, C. (2013). Numerical Modelling of flumes with moving dunes – TELEMAC3D and Sisyphé. Proceedings of Marine and River Dune Dynamics – MARID IV, 15. & 16. April, Bruges, Belgium. VLIZ Special Publication 65.

Goll, A., Kopmann, R., Baron, M. (2013). Kontinuierliche Validierung hydrodynamischer und morphodynamischer Modelle mit physikalischen Modellversuchen. Wasserwirtschaft, Ausgabe 12/2013, S 28-33, Springer Verlag.

Goll, A. (2014). Numerische Simulation von Dünen. Kolloquium Herausforderung Sedimenttransport – Methoden und Konzepte im Flussbau. Bundesanstalt für Wasserbau. Karlsruhe.

Grafmüller, G. (2012). Untersuchungen von Buhnenvarianten in einem Laborgerinne mit Kieselsohle mit Hilfe punktueller Geschwindigkeitsmessungen. Bachelorarbeit Karlsruher Institut für Technologie.

- Grafmüller, T. (2009). Sensitivitätsanalysen für die morphodynamischen Verfahren TELEMAC2D / SISYPHE und FLUMEN anhand morphologischer Versuche in einer Laborrinne. Diplomarbeit Universität Karlsruhe.
- Günter, A. (1971). Die kritische mittlere Sohlschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlschubspannungsschwankungen. Mitteilung Nr. 3 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.
- Haber, B. (2012). Physikalische Modellversuche zu Austauschprozessen zwischen Hauptströmung und der Bühnenfeldströmung von Kerbbuhnen. Diplomarbeit Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Henning, M. (2013). Mehrdimensionale statistische Analyse räumlich und zeitlich hoch aufgelöster Oberflächen von Dünenfeldern. Dissertation Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig.
- Hentschel, B., Henning, M., Hüsener, T. (2012). Modifikation an Bühnenfeldern. Wasserbau Symposium 2012 „Wasser – Energie, Global denken – lokal handeln“. Graz, Österreich. 12.-15. September.
- Hübner, O. (2013). Messung und Analyse punktueller Geschwindigkeiten in einem Laborgerinne mit fester Kieselsohle. Diplomarbeit KIT Karlsruhe.
- Imiela, M. (2003). Langfristige mehrdimensionale Feststofftransportmodellierung zum morphologischen Gleichgewichtszustand anhand von Modellversuchen und einer Renaturierungsmaßnahme an der Enz. Diplomarbeit an der Universität Karlsruhe.
- IWG (2014): 4. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung, Endbericht. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Dezember 2014.
- Hirano, M. (1971). River bed degradation with armouring. Proceedings Japan Society of Civil Engineers 195.
- Hüsener, T., Faulhaber P., Baron, M. (2012). Modifikationen in bestehenden Stromregulungssystemen an Wasserstraßen. Proceedings des Wasserbausymposium 2012 TU München, ETH Zürich und TU Graz, 12.-15.09.2012. Graz, Österreich.
- Kallenberg, M. (2014). Berechnung der turbulenten kinetischen Energie aus Geschwindigkeitsmessungen. Interner Bericht der BAW.
- Knight, D.W., Brown, F.A. (2001). Resistance studies of overbank flow in rivers with sediment using the flood channel facility. Journal of Hydraulic Research. Vol. 39, No 1.
- Kopmann, R. (2006). Kurzbericht zur Implementierung eines Ansatzes zur Berücksichtigung von Sekundärströmung in Betrag und Richtung der Schubspannung. Interner Bericht BAW Karlsruhe.

Kopmann, R., Schmidt, A. (2008). Reliability analysis of two-dimensional morphodynamic results. River Flow 2008 – International Conference on Fluvial Hydraulics. Turkey.

Kopmann, R., Schmidt, A. (2010). Comparison of different reliability analysis methods for a 2D morphodynamic numerical model of River Danube. River Flow 2010 – International Conference on Fluvial Hydraulics. Braunschweig, 8.-10.9.2010 p1615-1620.

Kopmann, R., Merkel, U., Riehme, J. (2012). Using Reliability Analysis in Morphodynamic Simulation with TELEMAC-2D / SISYPHE, Proceedings of the XIXth Telemac Users Club, Wallingford, 18.-19.10.2012, pp. 119-126

Kopmann, R., Merkel, U., Riehme, J. (2012). Using Reliability Analysis in Morphodynamic Simulation with TELEMAC-2D / SISYPHE. Proceedings of the XIXth Telemac-Mascaret Users Conference, Wallingford, 18.-19.10.2012, pp. 119-126.

Kopmann, R., Merkel, U. (2013). Drei Jahre Telemac Open Source. Wasserwirtschaft 12, 2013, S. 12-15.

Kopmann, R., Schäfer, M. (2014). Automatic Calibration with Telemac-AD. Vortrag bei XXIst Telemac-Mascaret Users Conference, Grenoble, 15.-17.10.2014

Lai, Y.G., Greimann, B.P. (2010). Predicting contraction scour with a two-dimensional depth-averaged model. Journal of Hydraulic Research Vol. 48, No. 3 (2010), pp. 383–387

Lemieux, C. (2009). Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Sampling. 2009, Edition Springer Series in Statistics, pp. 201–203.

Leichtweiß-Institut (2008). Dünenentransport über einer teilbefestigten Sohle. Bericht 999 zum Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau, Leichtweiss-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig.

Lüders, N. (2015). Hydraulische Auswirkungen durch die Verfüllung von Bühnenkopfkolken. Bachelorarbeit, KIT Karlsruhe.

Untersuchungen in einer Laborrinne

Mai, T.H., Kopmann, R., Nowak, W. (2015). Using Algorithmic Differentiation for uncertainty analysis. Proceedings Telemac-Mascaret User Conference 2015.

Mai, T.H. (2015). Application of reliability analysis methods to a numerical model of river Rhine. Masterthesis University of Stuttgart.

Mattia, F., Wang, D., Hervouet, J.M., Leopardi, A., El Kadi Abderrezzak K., Tassi, P. (2013). Numerical simulations of bar formation and propagation in straight and curved channels. XXth TELEMAC-MASCARET Users conference, Karlsruhe, Germany.

Marek, M., Dittrich, A. (2004). 3D numerical calculations of the flow in an open-channel consisting of an expansion and contraction. 6th Intl. Conf. Hydro-Science and Engineering, Brisbane, Australia, (CD-Rom).

- Melching, C.S. (1992). An improved first-order reliability approach for assessing uncertainties in hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, 132, pp. 157-177.
- Merkel, U.H. (2010). Final Report to Contract BAW 2010-08-09. Abschlussbericht zu Vertrag "Vereinfachung der Installation von DredgeSim und Verbesserung des Sekundärströmungsansatzes und des Ansatz des gravitationellen Transports".
- Merkel, U.H. (2011). Validation of SISYPHE V6P0 with 2 flume experiments. Bericht zu den Workpackages 1, 3a, 3b, 4e des Vertrags "Validierung und Verbesserungen des morphodynamischen Moduls Sisyphé."
- Merkel, U.H., Kopmann, R. (2011). A continuous sediment layer concept for Sisyphé. Proceedings of the XVIIIth Telemac Users Club, Chatou, 19.-21.10.2011, pp. 105-110.
- Merkel, U.H. (2012). Report #3. 3. Bericht zum Vertrag "Validierung und Verbesserungen des morphodynamischen Moduls Sisyphé."
- Merkel, U.H., Kopmann, R. (2012a). Continuous Vertical Grain Sorting for TELEMAC & SISYPHE v6p2. Sisyphé. Proceedings of the XIXth Telemac Users Club, Wallingford, 18.-19.10.2012, pp. 9-18.
- Merkel, U.H., Kopmann, R. (2012b). A continuous vertical grain sorting model for Telemac & Sisyphé. *River Flow 2012 – Murillo* (Ed.) © 2012 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62129-8
- Merkel, U.H., Riehme, J., Naumann, U. (2013a). Rückrechnung von Rand- und Anfangsbedingungen mit Telemac und Algorithmischer Differentiation. *Wasserwirtschaft H.12*, 2013, S.22-27.
- Merkel, U.H., Riehme, J., Naumann, U. (2013b). Reverse Engineering of Initial and Boundary Conditions with TELEMAC and Algorithmic Differentiation. Proceedings XXth Telemac-Mascaret User Conference 2013, 16.-18.10.2013, Karlsruhe.
- Merkel, U., Kopmann, R. (2014). Einsatz eines innovativen Untergrundmodells für die Feststofftransportmodellierung. Beitrag zum BAW Kolloquium Herausforderung Sedimenttransport – Methoden und Konzepte im Flussbau. 26. November 2014.
- Mewis, P. (2012). Alternate bar instability as a verification test of a morphodynamic numerical model. Int. Conference on Hydroscience and Engineering. Orlando, Florida.
- Mietz, S.K., Hentschel, B. (2015). Analyse und Vergleich morphologischer Bühnenmodellversuche. Beitrag zum 17. JuWi Treffen 26.-28.8.2015 in Dresden. TU Dresden.
- Minh Duc, B., Rodi, W. (2008). Numerical Simulation of Contraction Scour in an Open Laboratory Channel. *Journal of Hydraulic Engineering* 134(4), 367–377.
- Naumann, U. (2012). *The Art of Differentiating Computer Programs – An Introduction to Algorithmic Differentiation*. SIAM, Philadelphia.

Naumann, U., Riehme, J. (2005). A differentiation-enabled Fortran 95 compiler. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 31(4):458–474, 2005.

Naumann, U., Numerical Algorithms Group Ltd. (NAG) (2015). *dco/fortran : User Guide. AD-enabled NAG Fortran compiler: User Guide. Software and Tools for Computational Engineering (STCE)*, RWTH Aachen University, Germany

Nikitina, L., Nikitin, I., Clees, T. (2008). Studie zur Zuverlässigkeitsanalyse morphodynamischer Modelle. Abschlussbericht zum Arbeitspaket (WP) 1. Fraunhofer Institut Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI.

Nikitina, L., Clees, T. (2009a). Fallstudie für die Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Methode MC-CL. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 2.1. Fraunhofer Institut Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI.

Nikitina, L., Clees, T. (2009b). Entwicklung der Softwaretools CLcomp und DoE. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 2.2. Fraunhofer Institut Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI.

Nikitina, L., Nikitin, I., Steffes-lai, D. Clees, T. (2010). Zuverlässigkeitsanalyse für stark nicht-lineare Funktionen $y(x)$ mittels einer speziellen, durch RBF-Metamodellierung beschleunigten Monte-Carlo-basierten Methode zur CL-Berechnung. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 2.3. Fraunhofer Institut Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI.

Nzokou Tanekou, F. (2002). Multidimensional numerical bed-load transport modelling of a physical model with groynes (Schönberg). Master thesis at Universität Stuttgart.

Papazzoni, M. (2005). Reliability of the morphodynamic model „SISYPHE“. Praktikumsbericht der Ingenieursschule MATMECA Ecole d’Ingenieurs en Modélisation Mathématique et Mécanique.

Rátky, É. (2006). Modellierung von Geschiebezugaben am Niederrhein bei Wesel mit einem 2D-tiefengemittelten morphologischen Modell. Diplomarbeit an der Universität Karlsruhe.

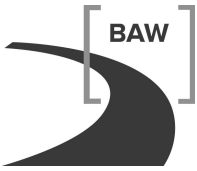
Rátky, É. (2008). Abschlussbericht zum Vertrag Morphodynamische Modellierungen mit dem Programm Sisyphe von geplanten Versuchen in der Flussbauversuchsrinne.

Richter, K. (2011). Physikalische Modellversuche zur Auswirkung von Kerbbuhnen auf die Morphologie und den Geschiebetransport des Flussschlauchs. Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Universität Kaiserslautern. Diplomarbeit.

Ribberink, JS. (1987). Mathematical modelling of one-dimensional morphological changes in rivers with non-uniform sediment. Delft University of Technology.

Riehme, J.; Kopmann, R.; Naumann, U. (2010). Uncertainty quantification based on forward sensitivity analysis in Sisyphe. Fifth European Conference on Computational Fluid Dynamics, Lissabon, Portugal, 14.-17.6.2010.

- Riehme, J., Naumann, U. (2015). Userguide : AD-Telemac2d v6p2. Unterstützung der Lösung hochdimensionaler nichtlinearer Optimierungsprobleme im Wasserbau mittels adjungierter Versionen von Sisyphé / Telemac. Abschlussbericht für die BAW, Karlsruhe. LuFG Informatik 12, RWTH Aachen University, Germany
- 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.; Brudy-Zippelius, T.; Wenka, T.; Nestmann, F. (2015): Multidimensional Bed Load Transport Modelling of a Secondary Flow influenced Curved Channel. Journal of Applied Water Engineering and Research, reviewed.
- Sadid, N. (2013). Hydro-morphodynamic modelling using a coarse 2D model in comparison to results from a 1D model for a 70km long Odra stretch. Masterarbeit Universität Stuttgart.
- Schäfer, M. (2014). Erprobung von Optimierungsalgorithmen für die Kalibrierung eines Finite-Elemente Strömungsmodells auf Basis von Gradienten. Masterarbeit Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- Schankat, M., Wieprecht, S. (2006). Literaturstudie zu morphologischen Rinnenversuchen. Technischer Bericht Nr. 06/2006. Institut für Wasserbau Universität Stuttgart.
- Schmitt-Heiderich, P. (1995). Vorfluterbelastung aus städtischen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung von Unsicherheiten. Dissertation, Schriftenreihe Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Nr. 54.
- Schneider, M. (2013). Vergleich der Sohlentwicklung bei unterschiedlichen Regelungsbauwerken. Bachelorarbeit KIT Karlsruhe.
- Schröder, M., Wurms, S. (2014). Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes am Beispiel des Rheins zwischen Mainz und St. Goar. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.03. KLIWAS-45/2014. BAW / BfG, Koblenz
- Stein, M. (1987), Large Sample Properties of Simulations Using Latin Hypercube Sampling. Technometrics 29, 143–151.
- Thielmann, Steffen (2013). Messung und Auswertung punktueller Geschwindigkeiten über fixierten Sanddünen. Bachelorarbeit Gesamthochschule Kassel.
- Villaret, C., Hervouet, J.M., Kopmann, R., Merkel, U.H., Davies, A.G. (2013). Morphodynamic modeling using the Telemac finite-element system. Computers & Geosciences 53 pp 105-113.
- Villaret, C., Kopmann, R., Wyncoll, D., Riehme, J., Merkel, U., Naumann, U. (2015). First-order Uncertainty Analysis using Algorithmic Differentiation of the Telemac-2D/Sisyphé morphodynamic model. Computers & Geosciences. Reviewed.



Viparelli, E., Haydel, R., Salvaro, M., Wilcock, P.R., Parker, G. (2010). River morphodynamics with creation/consumption of grain size stratigraphy 1: laboratory experiments, *Journal of Hydraulic Research*, 48:6, 715-726.

Walzer, A. (2000). Numerische Untersuchungen einer neuartigen Bühnenform. Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar.

Weise, S. (2001). Verifikation eines zweidimensionalen Feststofftransportmodells anhand von hydraulischen Versuchen. Diplomarbeit an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (FH).

Westfahl, M. (2007). Validierung des Programms SediMorph anhand ausgewählter morphologischer Rinnenversuche. Institut für Hydromechanik und Wasserbau der Bundeswehruniversität München.

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.

Bundesanstalt für Wasserbau
Karlsruhe, Dezember 2015

