

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Proceedings, Published Version

**Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.)**

## **Wasserbauliche Herausforderungen an den Binnenschifffahrtsstraßen**

Kolloquium am 26. und 27. Oktober 2017

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105250>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2017): Wasserbauliche Herausforderungen an den Binnenschifffahrtsstraßen. 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.



# BAWKolloquium

## Tagungsband

Wasserbauliche Herausforderungen an den Binnenschifffahrtsstraßen  
26. und 27. Oktober 2017





## Programm – Donnerstag, 26. Oktober 2017

13:00 Uhr	Begrüßung und Einführung <i>Prof. Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann (BAW)</i>
<b>Eröffnungsvortrag</b>	
13:15 Uhr	Herausforderungen für die Rhein- und europäische Binnenschifffahrt <i>Bruno Georges LL.B. (ZKR, Frankreich)</i>
<b>Block 1: Infrastruktur</b> Moderation: <i>Dr.-Ing. Carsten Thorenz (BAW)</i>	
13:45 Uhr	Hydraulische Kriterien für die Dimensionierung von Schleusen: Neue Entwicklungen und künftige Herausforderungen <i>Lydia Schulze M. Eng. (BAW)</i> <i>Torsten Hartung M. Sc. (BAW)</i>
14:15 Uhr	Numerische Modellierung zur Untersuchung strömungsinduzierter Schwingungen im Stahlwasserbau <i>Georg Göbel M. Sc. (BAW)</i>
<hr/>	
14:45 Uhr	Pause
<b>Block 2: Schifffahrt</b> Moderation: <i>Dr.-Ing. Michael Schröder (BAW)</i>	
15:15 Uhr	Digitalisierung in der Binnenschifffahrt <i>Prof. Dr.-Ing. Bettar O. el Moctar (ISMT, Universität Duisburg-Essen)</i>
15:45 Uhr	Ökologische und ökonomische Betrachtungen zur Binnenschifffahrt am Beispiel der EU-Projekte MoVe IT! und PROMINENT <i>Juha Schweighofer D. Sc. (viadonau, Österreich)</i>
<b>Block 3: Umwelt</b> Moderation: <i>Dr. sc. techn. Roman Weichert (BAW)</i>	
16:15 Uhr	Integrative Ansätze zur Bewältigung der wasserbaulichen Herausforderungen an der österreichischen Donau <i>Mag. Robert Tögel (viadonau, Österreich)</i>
16:45 Uhr	Fischabstieg an Wehranlagen – gefahrlos oder kritisch? <i>Dr. sc. techn. Roman Weichert (BAW)</i>
17:15 Uhr	Diskussion
17:45 Uhr	Laborbesichtigung
18:30 Uhr	Gemeinsames Abendessen



## Programm – Freitag, 27. Oktober 2017

<b>Block 4: Daten</b> Moderation: Dr.-Ing. Thomas Brudy-Zippelius (BAW)	
09:00 Uhr	Über den Wert von Naturdaten für die Aufgaben der WSV <i>Dipl.-Ing. Petra Herzog (BfG)</i>
09:30 Uhr	BIM, WInD & Co - Digitalisierung im Verkehrswasserbau <i>Dr.-Ing. Jörg Bödefeld (BAW)</i>
<b>Block 5: Methoden und Verfahren</b> Moderation: Dr.-Ing. Nils Huber (BAW)	
10:00 Uhr	Fahrdynamikbasierte Entscheidungsmodelle zur mikroskopischen Simulation des Verkehrsflusses auf Binnenwasserstraßen <i>Dipl.-Phys. Nicolas Fischer (TU Dresden)</i>
10:30 Uhr	Pause
11:00 Uhr	Verfahrensentwicklung für die numerische Langfristsimulation im Flussbau <i>Dr.-Ing. Leopold Stadler (BAW)</i>
11:30 Uhr	Geschiebetransport im gegenständlichen Modell: Neue Ansätze zur naturähnlichen Abbildung komplexer morphodynamischer Prozesse <i>Dipl.-Ing. Bernd Hentschel (BAW)</i> <i>Prof. Dr.-Ing. Bernd Ettmer (Hochschule Magdeburg-Stendal)</i>
12:00 Uhr	Diskussion
12:20 Uhr	Schlusswort <i>Prof. Dr.-Ing. Andreas Schmidt (BAW)</i>
12:30 Uhr	Ende der Veranstaltung

## Liste der Referenten

Bödefeld, Dr.-Ing. Jörg	Bundesanstalt für Wasserbau Kußmaulstr. 17 76187 Karlsruhe
el Moctar, Prof. Dr.-Ing. Bettar Ould	Universität Duisburg-Essen Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme (ISMT) Bismarckstr. 69 47057 Duisburg
Ettmer, Prof. Dr.-Ing. Bernd	Hochschule Magdeburg-Stendal Breitscheidstr. 2 39114 Magdeburg
Fischer, Dipl.-Phys. Nicolas	Technische Universität Dresden Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List" (IWV) Würzburger Str. 35 01187 Dresden
Georges, LL.B. Bruno	Zentralkommission für die Rheinschifffahrt Palais du Rhin - 2, place de la République 67082 Strasbourg Cedex Frankreich
Göbel, M. Sc. Georg	Bundesanstalt für Wasserbau Kußmaulstr. 17 76187 Karlsruhe
Hartung, M. Sc. Torsten	Bundesanstalt für Wasserbau Kußmaulstr. 17 76187 Karlsruhe

Hentschel, Dipl.-Ing. Bernd	Bundesanstalt für Wasserbau Kußmaulstr. 17 76187 Karlsruhe
Herzog, Dipl.-Ing. Petra	Bundesanstalt für Gewässerkunde Am Mainzer Tor 1 56068 Koblenz
Schulze, M. Eng. Lydia	Bundesanstalt für Wasserbau Kußmaulstr. 17 76187 Karlsruhe
Schweighofer, D.Sc. Juha	via donau - Österreichische Wasserstraßen- Gesellschaft mbH Donau-City-Straße 1 1220 Wien Österreich
Stadler, Dr.-Ing. Leopold	Bundesanstalt für Wasserbau Kußmaulstr. 17 76187 Karlsruhe
Tögel, Mag. Robert	via donau - Österreichische Wasserstraßen- Gesellschaft mbH Donau-City-Straße 1 1220 Wien Österreich
Weichert, Dr. sc. techn. Roman	Bundesanstalt für Wasserbau Kußmaulstr. 17 76187 Karlsruhe

## Teilnehmerliste

Name	Firma	Ort
Aberle, Prof. Dr. Jochen	Abteilung Wasserbau Leichtweiß-Institut für Wasserbau TU Braunschweig	Braunschweig
Beck, Tarek	Bundesanstalt für Wasserbau	Karlsruhe
Bednarski, Lisa	Hülskens Wasserbau GmbH & Co. KG	Wesel
Belzner, Fabian	Bundesanstalt für Wasserbau	Karlsruhe
Bernhard, Prof. Dr. Söhngen	ehemals Bundesanstalt für Wasserbau	Bad Schönborn
Biene, Robert Roman	BearingPoint GmbH	Berlin
Bossert, Lisa		Karlsruhe
Botsch, Dr. Bertram		Karlsruhe
Brodersen, Lukas	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt	Minden
Brudy-Zippelius, Dr. Thomas	Bundesanstalt für Wasserbau	Karlsruhe
Fraaß, Torsten	Lahmeyer Hydroprojekt GmbH GB Spezialbau Engineering	Magdeburg
Dormann, Michael	grbv Ingenieure im Bauwesen GmbH & Co. KG	Hannover
Feierfeil, Tim	ingenieurbüro kauppert	Karlsruhe
Fischer, Uwe	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	Bonn
Folke, Frederik	Bundesanstalt für Wasserbau	Karlsruhe
Fuhrmann, Frauke	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt	Uelzen
Gellner, Martin	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt	Magdeburg
Goll, Nikolai	Amt für Neckarausbau	Heidelberg
Gräbing, David	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt	Mainz
Gramlich, Fritz	Hülskens Wasserbau GmbH & Co. KG	Wesel
Grote, Harald	Wasserstraßen-Neubauamt	Helmstedt
Grüter, Barbara	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt	Stuttgart
Hallermann, Stefanie	RMD Wasserstraßen GmbH	München
Handge, Axel	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt	Magdeburg
Hänßig, Peter	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt	Freiburg
Hausmann, Bernd	Bundesamt für Naturschutz	Bonn
Heinzelmann, Prof. Dr. Christoph	Bundesanstalt für Wasserbau	Karlsruhe
Hellbach, Christian	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt	Köln
Hellwig, René	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Duisburg-Rhein	Duisburg
Huang, Jiuru	Bundesanstalt für Wasserbau	Karlsruhe

<b>Name</b>	<b>Firma</b>	<b>Ort</b>
Huber, Dr. Nils Peter	Bundesanstalt für Wasserbau	Karlsruhe
Hüsener, Thorsten	Bundesanstalt für Wasserbau	Karlsruhe
Jäppelt, Dr. Ulrich	WTM Engineers GmbH	Hamburg
Jenrich, Dr. Holger	Lahmeyer Hydroprojekt GmbH GB Spezialbau Engineering	Magdeburg
Johmann, Stephan	KREBS+KIEFER Ingenieure GmbH	Karlsruhe
Kassem, Liena	Amt für Neckarausbau	Heidelberg
Kauppert, Klemens	ingenieurbüro kauppert	Karlsruhe
Knapp, Sigfrid	Bundesanstalt für Wasserbau	Karlsruhe
Köther, Martin	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt	Uelzen
Kubik, Marvin	Bundesanstalt für Wasserbau	Karlsruhe
Leukel, Holger	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	Bonn
Liebrecht, Arno	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt	Uelzen
Mäder, Martina	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt	Magdeburg
Mann, Thomas	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt	Mainz
Messing, Sebastian	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	Bonn
Michels, Klaus	Amt für Neckarausbau	Heidelberg
Nitschke, Andreas	Ramboll IMS Ingenieurgesellschaft mbH	Hamburg
Oetting, Gesche	WKC Hamburg GmbH	Hamburg
Orlovius, Andreas	Bundesanstalt für Wasserbau	Karlsruhe
Redeker, Marq	CDM Smith Consult GmbH	Düsseldorf
Röben, Johann	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt	Braunschweig
Rosenstein, Thomas	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	Bonn
Schmidt, Prof. Dr. Andreas	Bundesanstalt für Wasserbau	Karlsruhe
Scholz, Heiko	Lahmeyer Hydroprojekt GmbH GB Spezialbau Engineering	Magdeburg
Schröder, Dr. Michael	Bundesanstalt für Wasserbau	Karlsruhe
Schweitzer, Stephanie	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt	Bonn
Strack, Martin	RMD-Consult GmbH	München
Strenge, Rainer	Fachstelle der WSV für Verkehrstechniken	Koblenz
Tauer, Dr. Wolfram	Arcadis Germany GmbH	Darmstadt
Thorenz, Dr. Carsten	Bundesanstalt für Wasserbau	Karlsruhe
Thyßen, Heinz-Jakob	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Rheine	Rheine
Treichel, Jörn	Hülskens Wasserbau GmbH & Co. KG	Wesel



<b>Name</b>	<b>Firma</b>	<b>Ort</b>
Vieth, Heinz-Josef	KREBS+KIEFER Ingenieure GmbH	Karlsruhe
Vogel, Jörg	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt	Freiburg
Walz, Carolin	Bundesanstalt für Wasserbau	Karlsruhe
Wiedenhoff, Jan Peter	BearingPoint GmbH	Düsseldorf
Wollny, Matthias	Fichtner Water & Transportation GmbH	Freiburg
Yazdi, Yasmin	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt	Rheine
Zinßer, Georg	Ramboll IMS Ingenieurgesellschaft mbH	Hamburg



## Herausforderungen für die Rhein- und europäische Binnenschifffahrt

Dipl.-Ing. Kai Kempmann, Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR)

Dipl. Oec. und Dr. rer. pol. Norbert Kriedel, Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR)

Ass. iur. Jörg Rusche, Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR)

Dipl.-Ing., MPA Gernot Pauli, Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR)

Bruno Georges LL.B., Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR)

### Einleitung

Unsere Gesellschaften fordern eine nachhaltige Binnenschifffahrt, die modernen ökonomischen, ökologischen und sozialen Bedürfnissen entspricht. Daraus resultieren erhebliche Herausforderungen, für den Wasserbau an den Binnenschiffahrtstraßen und darüber hinaus für das Binnenschiffahrtssystem insgesamt. Der vorliegende Beitrag analysiert zentrale Herausforderungen für die Rhein- und europäische Binnenschifffahrt und zeigt Ansätze zum Umgang mit diesen Herausforderungen auf. Er erlaubt es zudem, die wasserbaulichen Herausforderungen in einem größeren Kontext zu sehen und mit denen der Binnenschifffahrt in Verbindung zu setzen.

Der Beitrag erläutert zunächst das Konzept einer nachhaltigen Binnenschifffahrt mit den daraus resultierenden An- oder Herausforderungen, vertieft anschließend einige dieser Herausforderungen und geht abschließend noch auf den „Good Navigation Status“ ein, der besondere Herausforderungen, auch für den Wasserbau, mit sich bringt.

### Nachhaltige Binnenschifffahrt

Die Verkehrsminister der EU (2001)<sup>1</sup> definieren ein nachhaltiges Verkehrssystem als „ein Verkehrssystem, das

- es ermöglicht, den grundlegenden Bedarf von Einzelpersonen, Unternehmen und Gesellschaften in Bezug auf Nutzung und Ausbau sicher und auf eine Art und Weise zu decken, die mit dem Gesundheits- und Ökosystemschutz in Einklang stehen und Gerechtigkeit für die aufeinander folgenden Generationen fördert;
- finanziell tragbar ist, ordentlich und effizient funktioniert, eine Auswahl zwischen Verkehrsträgern bietet und einer wettbewerbsfähigen Wirtschaft sowie einer ausgewogenen regionalen Entwicklung förderlich ist;
- Emissionen und Abfall auf den durch die Aufnahmefähigkeit der Erde vorgegebenen Umfang begrenzt, erneuerbare Ressourcen höchstens in dem Umfang verwendet, indem sich diese regenerieren, nicht erneuerbare Ressourcen höchstens in dem Umfang verwendet, indem erneuerbare Ersatzstoffe entwickelt werden, und die Auswirkungen auf den Flächenbedarf und die Lärmentwicklung dabei auf ein Mindestmaß verringert.“

Die Definition bezieht sich auf die drei Nachhaltigkeitssäulen Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt, wobei Verknüpfungspunkte untereinander bestehen.

---

<sup>1</sup> EU (2001): Strategy for Integrating Environment and Sustainable Development into the Transport Policy. Resolution in the minutes of the meeting of the EU Ministers responsible for Transport and Communications at the 2340th meeting of the European Union's Council of Ministers, held in Luxembourg, April 4-5 2001. 7587/01 (Presse 131).

### **Soziale Säule einer nachhaltigen Binnenschifffahrt**

Aus sozialer Sicht bezieht sich Nachhaltigkeit der Binnenschifffahrt auf „Einzelpersonen, Unternehmen und Gesellschaften“. Ihr „grundlegender Bedarf“ in Hinblick auf Binnenschifffahrt, zum Beispiel deren Versorgungssicherheit oder Einkommensmöglichkeiten, soll gedeckt werden. „Generationengerechtigkeit“ findet sowohl zwischen den Generationen als auch innerhalb der Generationen selbst statt. In der Binnenschifffahrt beinhaltet dies zum Beispiel Familienfreundlichkeit und Chancengleichheit zwischen den Geschlechtern im Berufszugang und bei seiner Ausübung. Für die Beschäftigten in der Rhein- und Binnenschifffahrt kann sie zudem die Möglichkeit zur Teilnahme am gesellschaftlichen, kulturellen, politischen und religiösen Leben verstanden werden.

Eine zukünftige Herausforderung im Rahmen des sozialen Aspekts der Nachhaltigkeit könnte die Zurverfügungstellung einer ausreichenden Anzahl von Liegeplätzen für die Binnenschifffahrt sein. Liegestellen sind von besonderer sozialer Bedeutung, da sie den Austausch von Personal, das an Bord nehmen der Familie, das zur Schule bringen der Kinder, das Einkaufen von Lebensmitteln, oder kurz das Teilhaben am gesellschaftlichen Leben ermöglichen. Bei der Einrichtung der Liegestellen könnten besondere Aspekte wie Autoabsetzplätze, Anschluss an das öffentliche Straßennetz und an den öffentlichen Personenverkehr, Anschluss an das Landstromnetz zur Versorgung der Bordsysteme und zum Laden von Akkumulatoren für den Schiffsantrieb, Abdeckung mit Mobilfunk und Internet sowie Bekanntgabe der Belegung mittels RIS berücksichtigt werden. Besondere Bedeutung kommt auch der Einrichtung von Liegeplätzen für die Gefahrgutschifffahrt zu, da immer mehr Produkte als Gefahrgut unter blauen Kegeln transportiert werden müssen.

### **Ökonomische Säule einer nachhaltigen Binnenschifffahrt**

„Finanzielle Tragbarkeit“ der Binnenschifffahrt bezieht sich auf mehrere Akteure. Für die Gesellschaft ist Binnenschifffahrt wirtschaftlich tragbar, wenn der Nutzen der Schifffahrt die öffentlichen Investitionen und Subventionen übersteigt und externe Kosten internalisiert sind. Für Beschäftigte des Sektors kann finanzielle Tragbarkeit in Hinblick auf Löhne und soziale Sicherheit beurteilt werden. Für Auftraggeber sind hingegen wettbewerbsfähige Preise, für Auftragnehmer Kosten und Gewinnmargen entscheidend für eine wirtschaftliche Tragbarkeit.

Nachhaltigkeit beinhaltet zudem eine hohe Zuverlässigkeit, sowie Effizienz beispielsweise bei der Nutzung von Flotte, Infrastruktur und Rohstoffen. Die Einbindung der Binnenschifffahrt in logistische Ketten wird unter anderem durch die Verfügbarkeit und Qualität von Verknüpfungspunkten zu den anderen Verkehrsmodi bestimmt.

Zur Steigerung der Effizienz der Binnenschifffahrt ist es erforderlich, weiter intensiv an neuen RIS-Technologien und deren Implementierung zu arbeiten. So könnte zum Beispiel zukünftig ein Reiseplaner für die Binnenschifffahrt entwickelt werden, der auf Grundlage des Schiffsverkehrs und der individuellen Fahrzeiten die Schleusenbelegungen vorplant und so einen individuellen Reiseplan mit belastbaren Ankunftszeiten für die Binnenschifffahrt errechnet. Dies wird in der Zukunft immer größere Bedeutung erlangen, da die Containerschifffahrt unter engen zeitlichen Rahmenbedingungen operiert, Umschlagstellen nur in festgelegten Zeitfenstern verfügbar sind und die Intermodalität immer weiter an Bedeutung zunehmen wird. Die Binnenschifffahrt muss auf die Anforderungen der Industrie entsprechend reagieren und Konzepte erarbeiten um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu verbessern und in der Konkurrenz der Verkehrsträger zu bestehen.

## **Ökologische Säule einer nachhaltigen Binnenschifffahrt**

Die Binnenschifffahrt beeinflusst die Umwelt beispielsweise durch Emissionen, Abfall, Abwasser, Ressourcenverbrauch und Landnutzung. Emissionen sind insbesondere Treibhausgase, sowie Schadstoffemissionen. Sie können aus Motoren und der Ladung stammen. Wichtige Schadstoffemissionen der Binnenschifffahrt sind Kohlendioxid, Stickoxide und Feinstaub. Lärmemissionen entstammen vor allem aus Schiffsmotoren. Durch Schiffsbetrieb und Ladung entstehen in der Binnenschifffahrt zudem Abfall und Abwasser.

Mit Inkrafttreten der europäischen Verordnung über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte (NRMM Verordnung, EU Nr. 2016/1628) wurden auch neue, sehr anspruchsvolle Grenzwerte für Schadstoffemissionen neuer Schiffsmotoren (EU Stufe V) eingeführt. Für die Binnenschifffahrt bedeutet dies, dass neue kleine Motoren ab 2019 und neue große Motoren ab 2020 die EU Stufe V gemäß der NRMM Verordnung erfüllen müssen. Auf Grund des sehr kleinen Marktes für Binnenschiffsmotoren in der Europäischen Union wird es eine Herausforderung für die global arbeitenden Hersteller von Schiffsmotoren sein, den Anforderungen der EU Stufe V entsprechende Schiffsmotoren für die europäische Binnenschifffahrt zu wettbewerbsfähigen Preisen anzubieten.

Ein weiterer Aspekt der ökologischen Säule der Nachhaltigkeit ist die Dekarbonisierung der Kraftstoffe der Binnenschifffahrt. Für den Übergang von fossilen Energieträgern auf kohlenstoffarme oder -freie Kraftstoffe stehen Brückentechnologien wie zum Beispiel tiefgeköhlt verflüssigtes Erdgas (LNG) zur Verfügung. Weltweit wird intensiv an der Einführung von LNG als Brennstoff für die Schiffsantriebe gearbeitet. China könnte zukünftig wegweisend für den Einsatz von LNG in der Binnenschifffahrt sein. Erste Schiffe auf dem Rhein nutzen bereits LNG, jedoch ist noch kein flächendeckendes Netz an LNG Bunkerstationen verfügbar. Zudem besteht noch Forschungsbedarf hinsichtlich der Reduzierung des Slips von klimawirksamen Methan bei Gasmotoren. Parallel hierzu wird auch an der Nutzung von Methanol für Schiffsmotoren (Methanol-Brennstoffzelle) geforscht.

Zukünftig sollten Kraftstoffe keinen Kohlenstoffausstoß mehr verursachen. Die Technologien hierfür sind bereits vorhanden, wie zum Beispiel Wasserstoff-Brennstoffzellen oder leistungsfähige Akkumulatoren für den Elektroantrieb; sie müssen jedoch zukünftig auf die Belange der Binnenschifffahrt hin angepasst werden. Aus der Dekarbonisierung können weitere Herausforderungen entstehen, zum Beispiel bei der Planung von Liegestellen. Die zukünftigen Anforderungen der Binnenschifffahrt an die Ausrüstung der Liegestellen sollten bereits heute mit berücksichtigt werden.

Zudem haben im Rahmen des Übereinkommens über die Sammlung, Annahme und Abgabe von Abfällen in der Rhein- und Binnenschifffahrt (CDNI) dessen Mitgliedsstaaten Regelungen zum Entgasen von gasförmigen Resten flüssiger Ladung erarbeitet und im Juni 2017 beschlossen. Die Ratifikation steht noch aus. Während früher Tankschiffe in der Regel während der Fahrt entgast wurden, fordert der Umwelt- und Gesundheitsschutz heute einen sensibleren Umgang mit Gefahrgütern. Zukünftig dürfen Tanks, in welchen in einer Stoffliste des CDNI aufgeführten Stoffe transportiert wurden, nur noch an den dafür zugelassenen Stationen entgast werden. Damit diese Regelung von der Binnenschifffahrt beachtet und umgesetzt werden kann, ist es erforderlich, dass zukünftig flächendeckend eine ausreichende Anzahl von Entgasungsstationen für die Binnenschifffahrt bereitgestellt wird.



Zu bemerken ist dabei, dass erwartet wird, dass sich der Markt verstärkt auf Einheits- und kompatible Transporte setzen wird, um überflüssiges Reinigen und damit einhergehende Kosten (die in der Höhe der Fracht kosten liegen könnten) vermieden werden.

### **Soziale Herausforderungen**

Das Verkehrssystem und dessen Nutzer in Industrie, Handel und Tourismus sind darauf angewiesen, dass es der Binnenschifffahrt auch künftig gelingt, in ausreichendem Umfang qualifiziertes nautisches Personal zu gewinnen. Erfreulicherweise hat die nationale Ausbildungsförderung, stärkere Ausbildungsanstrengungen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung und des Gewerbes sowie die bessere Berücksichtigung der Auszubildenden in den Besatzungstabellen der Verordnung über das Schiffpersonal auf dem Rhein in Deutschland dazu geführt, dass der Anteil der Beschäftigten zwischen 16 und 26 Jahren im letzten Jahrzehnt wieder deutlich gestiegen ist. Bereits am 1. Dezember 2017 wird einen weiteren Schritt zur besseren Berücksichtigung der Auszubildenden in den von der ZKR entwickelten Besatzungstabellen unternommen.

Neueinsteiger haben hervorragende Karrierechancen in der Binnenschifffahrt. Das liegt an der demographischen Situation des Gewerbes, in dem rund 40 % der Schiffsführer in Deutschland älter als 55 Jahre sind. In Belgien und den Niederlanden ist die Situation mit rund 40 % der Schiffsführer mit mehr als 50 Lebensjahren nicht viel anders. Lebenslanges Lernen und Weiterbildung auch nach dem Schulabschluss mit Bootsmannbrief sind also enorm wichtig.

Einen Beitrag zur Flexibilisierung des Arbeitsmarkts leistet in diesem Zusammenhang die künftige EU-Richtlinie über die gegenseitige Anerkennung von Berufsqualifikationen in der Binnenschifffahrt. Diese erlaubt dem bei der ZKR geführten Ausschuss CESNI (Europäischer Ausschuss für die Ausarbeitung von Standards im Bereich der Binnenschifffahrt), harmonisierte Kompetenzstandards zu verabschieden, mit denen für das Rheinpatent und Qualifikationen nach der Verordnung für das Schiffpersonal auf dem Rhein und die entsprechenden EU-Zeugnisse vergleichbare Kenntnisse und Fertigkeiten vom Matrosen bis zum Schiffsführer gefordert werden, die ein hohes Sicherheitsniveau einhalten. Gleichzeitig erleichtert sie Quereinsteigern den Weg in die Binnenschifffahrt.

Die Umsetzung der Arbeitszeitrichtlinie 2014/112/EU in das Recht der Mitgliedsstaaten der Europäischen Union hat in diesem Jahr einen weiteren Anreiz gesetzt, sich in der Binnenschifffahrt beruflich zu engagieren. Planbare Freizeit sind wie attraktive Löhne und Gehälter Grundpfeiler einer attraktiven Binnenschifffahrt, die neue Berufseinsteiger wie viele andere Sektoren nicht mehr überwiegend aufgrund familiärer Vorprägung rekrutiert.

Mit einer Studie zu nachhaltigen Besatzungsregeln engagieren sich die Sozialpartner auf europäischer Ebene, denen es bereits gelungen ist, die Arbeitszeitregeln zu entwerfen, für eine gründliche Inventarisierung der Änderungen der Arbeitsbelastung in der Binnenschifffahrt. Sie wollen den Sektor noch attraktiver machen und können dabei natürlich wiederum auf die volle Unterstützung der ZKR setzen. Auch wegen des positiven Images des Gewerbes ist es wichtig, klare Regeln für das anwendbare Sozialversicherungsrecht zu erhalten und Sozialdumping zu bekämpfen. Hierzu sind gute Erfahrungen, die die ZKR gerade in der Güterschifffahrt mit Regelungen im Rheinstromgebiet gemacht hat, auf besondere Situationen in der Kabinenschifffahrt mit vielen unterschiedlichen Arbeitgebern an Bord nicht ohne weiteres zu übertragen, sondern müssen sorgfältig auf ihre Tauglichkeit in der Praxis geprüft werden. Auch hierzu steht die ZKR mit ihrem Know-how und ihrer Erfahrung gern bereit.

Schließlich hat die Industrie- und Handelskammer in Duisburg gerade eben den „Meister in der Binnenschiffahrt“ eingeführt. Für Unternehmer, die nicht schon in der Berufsschule eine Berechtigung zum Studium erworben haben, ist dies ein neuer innovativer Weg in der deutschen Binnenschiffahrt, der eine echte Zusatzqualifikation anbietet. Unter dem Eindruck dieser Initiative stellt sich die Frage, ob auf europäischer Ebene auch eine Überarbeitung der Anforderungen an die Unternehmereigenschaft in grenzüberschreitenden Güterverkehr mit dem Binnenschiff zu prüfen ist. Immerhin stammt die entsprechende Richtlinie aus dem Jahr 1985.

### **Wirtschaftliche Herausforderungen**

Als wesentliche wirtschaftliche Herausforderungen für die Rhein- und Binnenschiffahrt sind folgende vier Punkte zu nennen:

- Herausforderung 1: Ausschöpfung des Wachstumspotenzials in bestehenden Märkten
- Herausforderung 2: Erschließung neuer Märkte
- Herausforderung 3: Erhöhung der Resilienz gegenüber natürlichen Einflussfaktoren
- Herausforderung 4: Erweiterung der Finanzierungsquellen für Investitionen

### **Ausschöpfung des Wachstumspotenzials in bestehenden Märkten**

Märkte mit einer positiven Wachstumstendenz sind, in der Rheinschiffahrt, die Beförderung chemischer, land- und forstwirtschaftlicher Erzeugnisse und die Containerschiffahrt.

Das Wachstumspotenzial des Containertransports auf Binnenwasserstraßen ist erheblich, wird aber derzeit noch nicht voll ausgeschöpft. Begrenzende Faktoren sind zum einen unausgeschöpfte Potenziale bei der Intermodalität, und die Art der Einbindung von Binnenschiffen in die logistischen Prozesse von Seehäfen. So müssen Binnenschiffe hier oft lange Wartezeiten hinnehmen, da Seeschiffen meist Priorität bei der Abfertigung eingeräumt wird. Dies führt zu Verspätungen, und beeinträchtigt die Zuverlässigkeit der Binnenschiffahrt in der Logistikkette. Verschärft wird dieses Problem noch durch die sich seit einigen Monaten verstärkende Problematik der Abfertigungsstaus in Seehäfen.

Somit ergeben sich als konkrete Herausforderungen für die Containerschiffahrt:

- An der Schnittstelle zwischen Seehäfen und Binnenschiffen bedarf es deutlicher Effizienzsteigerungen. Die Umschlagsprozesse müssen zeitlich planbarer werden und die Interessen der Binnenschiffahrt in den Seehäfen besser berücksichtigt werden.
- In den Binnenhäfen ist ein weiterer Ausbau der trimodalen Hafeninfrastruktur anzustreben. Dies würde es der Binnenschiffahrt ermöglichen, weiteres Wachstum zu erzielen, über eine weitere Integration in multimodale Logistikketten.

Neben Containern weisen auch land- und forstwirtschaftliche Erzeugnisse ein großes Potenzial auf, das sich vor allem aus der vermehrten Verwendung von Agrarrohstoffen bei der Erzeugung regenerativer Energie, im Strom- und Wärmesektor, ergibt. Bei der Anlieferung der Rohstoffe ist die Binnenschiffahrt ein sehr geeigneter und gefragter Verkehrsträger.

Konkrete Herausforderungen für die Binnenschiffahrt im Bereich der Agrartransporte sind:

- Noch stärkere Einbindung der Binnenschiffahrt in die logistischen Prozesse am Agrarmarkt, und im Bereich der regenerativen Energieerzeugung.

- Aktive Suche nach neuen Betätigungsfeldern im Bereich der Transporte von Rohstoffen für die Erzeugung erneuerbarer Energie (zum Beispiel Belieferung von Biomassekraftwerken, Bio-Raffinerien, etc.)

Bei den chemischen Erzeugnissen besteht ebenfalls ein weiteres Wachstumspotenzial. Der Trend in der Rheinschifffahrt wird hier vor allem durch die chemische Produktion in Deutschland gespeist.

Wesentliche Herausforderungen für die Binnenschifffahrt in diesem Markt sind:

- Weitere Erhöhung der Zuverlässigkeit der Binnenschifffahrt in der Lieferkette bei chemischen Erzeugnissen. Dies betrifft insbesondere Anpassungsmaßnahmen gegenüber Niedrigwasserperioden (siehe Punkt „Erhöhung der Resilienz gegenüber natürlichen Einflussfaktoren“).
- Weitere Erhöhung der Sicherheitsstandards in der Tankschifffahrt, um einen sicheren, qualitativ hochwertigen Verkehrsträger am Verkehrsmarkt anbieten zu können.

### **Erschließung neuer Märkte**

Neue, noch kaum erschlossene Märkte in der Binnenschifffahrt sind vor allem urbane Wasserstraßentransporte, Transporte von Projektladung und Abfalltransporte.

Best-Practice-Beispiele für das erfolgreiche Agieren der Binnenschifffahrt auf diesen neuen Märkten:

- In Paris werden Konsumgüter per Containerbinnenschiff an mehrere Filialen einer Supermarkt-Kette ausgeliefert. Der Transport erfolgt auf Seine und Oise.<sup>2</sup>
- In London werden Baustoffe und auch Projektladung auf der Themse befördert.<sup>3</sup>
- In der belgischen Provinz Flämisch-Brabant wird Hausabfall in Containern per Binnenschiff zu Entsorgungsstationen transportiert.<sup>4</sup>

Da die Binnenschifffahrt hier neue Märkte betritt, besteht eine Herausforderung zunächst darin, die Vorteile dieses Verkehrsträgers noch mehr zu vermitteln, um Akteure in Bereichen zu überzeugen, die die Binnenschifffahrt bisher nicht oder kaum kannten. Wesentliche Herausforderungen für die Erschließung der genannten neuen Märkte sind daher:

- Bekanntmachung der ökologischen Vorteile von Binnenschifftransporten (Reduzierung von Luftschadstoff-Emissionen, Verbesserung der Luftqualität) und der verkehrsbezogenen Vorteile (Verminderung von Staus) in der Öffentlichkeit, bei Behörden und bei Verladern.
- Um in neuen Märkten agieren zu können, muss die nötige Infrastruktur verfügbar sein. Dies bedeutet, dass Anlege- und Umschlagplätze (auch in Städten) vorhanden sein müssen. Hier sind Fragen der Nutzungskonkurrenz mit anderen Bereichen (vor allem mit dem Wohn- und Immobilienbereich) zu lösen.
- Eine enge Kooperation zwischen Binnenschiffahrtsunternehmen, Binnenhäfen, Industrieunternehmen, Kommunen und städtischen Verwaltungen ist sicherzustellen.

---

<sup>2</sup> Quelle: Artikel « Franprix se fait déjà livrer par bateau, Monoprix par train», in : Le Parisien, 5. November 2014

<sup>3</sup> Siehe: <http://www.aggregate.com/our-businesses/bennetts-barges/case-studies/>

<sup>4</sup> Quelle: Artikel „Vlaams huisvuil voortaan over het water“, in: Scheepvaartkrant, 9. August 2017

## **Erhöhung der Resilienz gegenüber natürlichen Einflussfaktoren**

Die Binnenschifffahrt ist ein Verkehrsträger, der in starker Interaktion mit der natürlichen Umwelt steht. Im Laufe der vergangenen Jahre haben Niedrigwasserperioden die Transportentwicklung der Binnenschifffahrt bisweilen beeinträchtigt. Niedrigwasser<sup>5</sup> führt zu einer Verminderung der Beförderungsmenge, zu steigenden Kosten und Preisen des Systems Binnenschifffahrt und der Wirtschaft insgesamt, sowie zu einer – wenigstens – temporären Beeinträchtigung der Zuverlässigkeit dieses Verkehrsträgers.

Im Projekt KLIWAS wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt untersucht. Auch KLIWAS kommt zum Ergebnis, dass die Wasserabflussmengen in den Sommermonaten langfristig abnehmen können, mit streckenbezogenen deutlich negativen Auswirkungen auf ökonomische Parameter der Binnenschifffahrt (Anstieg der Kosten und der Preise, Rückgang der Ladungsmengen).

Ferner ist zu berücksichtigen, dass sich die Vulnerabilität der Binnenschifffahrt, also der Einfluss von Niedrigwasser auf das System Binnenschifffahrt, in den vergangenen Jahrzehnten deutlich verändert hat. Während in den fünfziger und sechziger Jahren deutlich extremere Niedrigwasser eintraten, war der Effekt auf die Binnenschifffahrt eher gering. Die Niedrigwasser der letzten Jahre, obwohl hydrologisch statistisch weniger auffällig, hatten erhebliche Auswirkungen auf das moderne multimodale System Binnenschifffahrt. Letzteres ist, etwa in der zukunftssträchtigen Containerschifffahrt, von fest getakteten Fahrplänen und komplexen Logistikketten geprägt, die eine höhere Vulnerabilität aufweisen als logistische Systeme der fünfziger und sechziger Jahre.

Aus diesen Gründen besteht eine wesentliche Herausforderung darin, den negativen Folgen von Niedrigwasser in geeigneter Form zu begegnen, bzw. diese Folgen für das System Binnenschifffahrt (und für die Wirtschaft insgesamt) abzumildern.

Als spezielle Herausforderungen sind hier zu nennen:

- Entwicklung logistischer Anpassungskonzepte, um die negativen Folgen von Niedrigwasser für das System Binnenschifffahrt abzumildern. Als ein Beispiel ist zu nennen: Einrichtung zusätzlicher Puffer-Lager (v.a. für Rohstoffe) bei Verladern, um die Versorgungssicherheit auch bei Niedrigwasser sicherzustellen.
- Stärkung der multimodalen Strukturen in Transportunternehmen mit Bezug zur Binnenschifffahrt, um bei Niedrigwasserperioden temporär auf andere Verkehrsträger zurückgreifen zu können, ohne langfristige Einbußen für die Binnenschifffahrt.

## **Erweiterung der Finanzierungsquellen für Investitionen**

Die Binnenschifffahrt ist ein Verkehrszweig mit einem hohen Anteil von Selbständigen, d.h. Unternehmen mit maximal einem oder zwei Beschäftigten. In den Niederlanden und Belgien sind rund 80 % aller Unternehmen in der Binnenschifffahrt selbständige Kleinunternehmen. Dementsprechend ist die Eigenkapital-Ausstattung bei den meisten Unternehmen eher gering.

---

<sup>5</sup> In der Hydrologie wird Niedrigwasser als das Eintreten eines geringen Wasserstandes oder Abflusses über eine bestimmte Andauer definiert, zum Beispiel als NM7Q, das niedrigste arithmetische Mittel von 7 aufeinanderfolgenden Tageswerten des Durchflusses in einem Niedrigwasserzeitabschnitt. Das System Binnenschifffahrt hingegen orientiert sich an einem Gleichwertigen Wasserstand (GIW) der auf einem Gleichwertigen Abfluss basiert, welcher an 20 Tagen pro Jahr unterschritten wird. Es ist daher nicht ohne weiteres möglich, die hydrologisch statistischen Erkenntnisse direkt auf das System Binnenschifffahrt zu übertragen.

Gleichzeitig besteht ein sehr hoher Investitionsbedarf, angesichts der notwendigen und kostspieligen Erneuerung und Modernisierung von Schiffen und Antriebsaggregaten.

Daraus ergeben sich als weitere Herausforderungen für die Binnenschifffahrt:

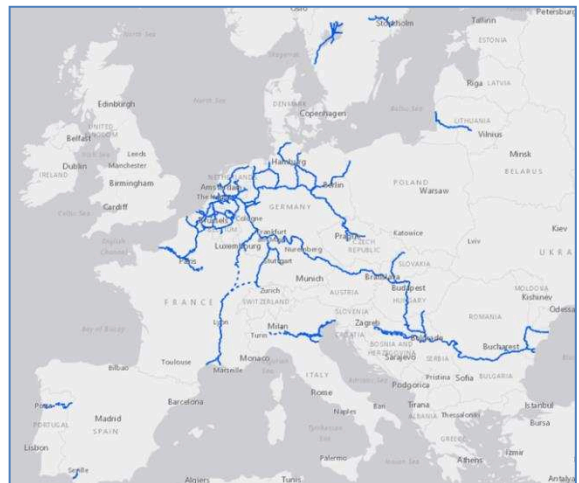
- Das Auffinden von weiteren Quellen der Fremd-Finanzierung, etwa über öffentliche Fonds der Europäischen Union oder über Kreditprogramme öffentlicher Banken.
- Das Konstruieren neuer Formen der Finanzierung im Gewerbe selbst, zum Beispiel über genossenschaftliche Finanzierungsformen.

### **Good Navigation Status (Gute Befahrbarkeit)**

Die Europäische Union unterstützt ebenfalls das Ziel einer nachhaltigen Mobilität. Dazu fördert sie unter anderem den Aufbau eines transeuropäischen Verkehrsnetzes. Die Verordnung über Leitlinien der Union für den Aufbau eines transeuropäischen Verkehrsnetzes – TEN-V (EU Nr. 1315/2013) regelt in Artikel 15 Abs. 3b), dass die Mitgliedstaaten gewährleisten, dass durch Instandhaltung der Flüsse, Kanäle und Seen eine stets gute Befahrbarkeit gewährleistet wird, wobei das geltende Umweltrecht einzuhalten ist.

Die TEN-V Verordnung gibt keine weiteren Erläuterungen zum Good Navigation Status, jedoch wird in Artikel 15 Abs. 3a gefordert, dass Flüsse, Kanäle und Seen die Mindestanforderungen an Binnenwasserstraßen der CEMT-Klasse IV erfüllen. Auf Antrag eines Mitgliedstaats kann die Europäische Kommission in gebührend begründeten Fällen Ausnahmen von den Mindestanforderungen in Bezug auf Tiefgang (weniger als 2,50m) und Mindesthöhen unter Brücken (weniger als 5,25m) gewähren.

Die Europäische Kommission hat 2015 ein Beraterkonsortium beauftragt, zusammen mit einer Europäischen Arbeitsgruppe zum Good Navigation Status (GNS), welcher Experten aus Verwaltungen, Verbänden und Flusskommissionen angehören, ein Konzept zum Good Navigation Status bis 2018 zu erarbeiten. Erste Dokumente hierzu wie ein Leitfaden zum Good Navigation Status und ein Bericht zu den Anforderungen an einen Good Navigation Status liegen bereits vor und können von der Webseite zum Good Navigation Status (<http://www.inlandnavigation.eu/what-we-do/good-navigation-status/>) heruntergeladen werden.



*Bild 1: TEN-V Wasserstraßen (Quelle: TENtec Datenbank, Europäische Kommission, 2017)*



Der Good Navigation Status besteht nach den Überlegungen der Europäischen Kommission und des Beraterkonsortiums aus drei Bausteinen, den sogenannten „hard components“ wie zum Beispiel die Abmessungen der Fahrrinne, den „soft components“ wie zum Beispiel das Management der Wasserstraße (Unterhaltung der Wasserstraße, Setzen von Schifffahrtszeichen, usw.) sowie den Mindeststandards für die Implementierung eines Good Navigation Status.

Hauptkritikpunkt am ersten Konzeptentwurf für einen Good Navigation Status war, dass das dort beschriebene Konzept zu starr und bürokratisch ist sowie zu wenig auf die hydromorphologischen Eigenschaften von Flüssen und Kanälen eingeht. So nutzt die TEN-V Verordnung zum Beispiel den Begriff Tiefgang zur Festlegung einer Tiefe von 2,50m. Von den Wasserstraßenverwaltungen kann hingegen lediglich eine Fahrrinntiefe messtechnisch erfasst werden. Auch wurde zunächst gefordert, dass die Tiefe von 2,50 m an 365 Tagen im Jahr an allen für das TEN-V Netz gemeldeten Wasserstraßen verfügbar sein muss. Die intensiven Diskussionen der letzten beiden Jahre haben jedoch dazu geführt, dass wichtige Elemente wie eine Flexibilisierung der Anforderungen an die Wasserstraßen und eine bessere Koordinierung mit den Anforderungen und Zielen der Wasserrahmenrichtlinie erreicht wurden.

Die Herausforderungen für die kommenden Jahre bestehen unter anderem darin, zusammen mit der Europäischen Kommission und den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union den Good Navigation Status weiter zu gestalten. Hierzu ist unter anderem vorgesehen, zur Ausarbeitung von angemesseneren Zielen für Flüsse und Kanäle für eine mögliche Revision der TEN-V Verordnung im Jahr 2023 bei der ZKR eine Korrespondenzgruppe einzurichten. Der Gruppe sollen neben Vertretern der Mitgliedsstaaten der Zentralkommission auch solche aus anderen europäischen Mitgliedsstaaten angehören. Der Rhein dient der Europäischen Kommission bei der Umsetzung der Verordnung als Good Practice Beispiel für internationale Abstimmungsprozesse der Unterhaltung und des Managements einer Wasserstraße. Für die anderen europäischen Wasserstraßen werden ähnliche Prozesse, sofern sie nicht schon vorhanden sind, implementiert werden müssen.

### Ausblick

Der Wunsch nach einer nachhaltigen Rhein- und Binnenschifffahrt, die modernen ökonomischen, ökologischen und sozialen Bedürfnissen entspricht, bringt vielfältige Herausforderungen mit sich. Um die Herausforderungen zu meistern und Nachhaltigkeit zu erreichen, ist Innovation unabdingbar. Die ZKR hat seit nunmehr 200 Jahren an zentraler Stelle die Innovation der Rhein- und Binnenschifffahrt gefördert und sie beabsichtigt dies auch für die nächsten 200 Jahre.

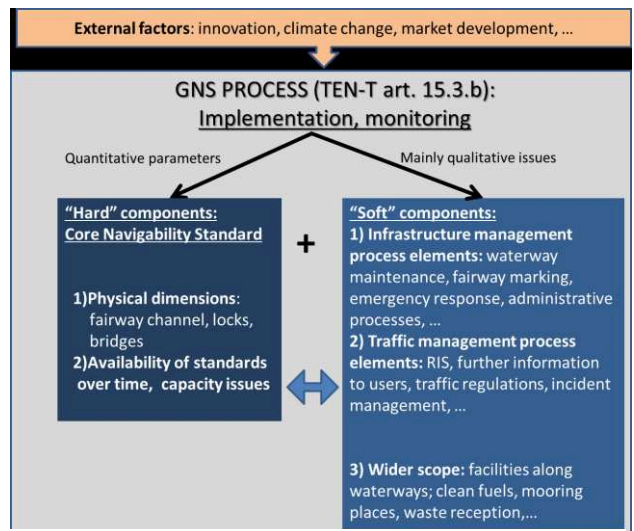


Bild 2: Der Good Navigation Status Prozess (Quelle: Task 3 report: Specification GNS requirements, Europäische Kommission, 2017)

## **Literatur**

Artikel « Franprix se fait déjà livrer par bateau, Monoprix par train» (5. November 2017),  
in: Le Parisien

Artikel „Vlaams huisvuil voortaan over het water“ (9. August 2017),  
in: Scheepvaartkrant

EU (2001): Strategy for Integrating Environment and Sustainable Development into the Transport Policy. Resolution in the minutes of the meeting of the EU Ministers responsible for Transport and Communications at the 2340th meeting of the European Union's Council of Ministers, held in Luxembourg, April 4-5 2001. 7587/01 (Presse 131).

Task 3 report: Specification GNS requirements (2017): Europäische Kommission

TENtec Datenbank (2017): Europäische Kommission

## **Hydraulische Kriterien für die Dimensionierung von Schleusen: Neue Entwicklungen und künftige Herausforderungen**

Lydia Schulze M. Eng., Bundesanstalt für Wasserbau

Fabian Belzner M. Eng., Bundesanstalt für Wasserbau

Torsten Hartung M. Sc., Bundesanstalt für Wasserbau

Dr.-Ing. Carsten Thorenz, Bundesanstalt für Wasserbau

### **Einleitung**

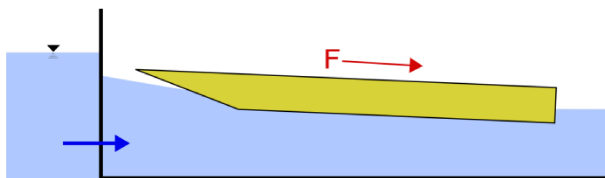
Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) betreibt etwa 400 Schiffsschleusenammern an den Bundeswasserstraßen, von denen etwa 47 % die durchschnittliche Nutzungsdauer von 80 Jahren bereits überschritten haben. Diese ungünstige Altersstruktur sowie veränderte Anforderungen an die Schleusenanlagen erfordern eine große Anzahl von Sanierungs- und Neubaumaßnahmen in den nächsten Jahrzehnten (vgl. BMVI 2016). Für eine wirtschaftliche und zukunftsorientierte Planung und Umsetzung der vielen zu erwartenden Neubau und Instandsetzungsprojekte der nächsten Jahre sollen dafür neueste wissenschaftliche Methoden eingesetzt und weiterentwickelt werden. An der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) werden derzeit in Forschungs- und Entwicklungsvorhaben sowohl die Kriterien für die Dimensionierung von Schleusen hinterfragt als auch die Methodik zur numerischen Simulation von Schleusungsprozessen weiterentwickelt. Ziel ist es, den Schleusungsvorgang mit gegenständlichen und numerischen Methoden verschiedener Dimensionen und Skalen oder einer Mischung verschiedener Methoden (hybride Modellierung) als Ganzes und im Detail beurteilen zu können. Die Herausforderung ist dabei, dass die Ergebnisse der verschiedenen Methoden vergleichbar und valide sein müssen. Weiterhin werden die Bemessungskriterien für Schleusen von Grund auf überarbeitet, so dass moderne semiprobabilistische Bemessungskonzepte angewendet werden können.

### **Dimensionierung von Schleusenfüllsystemen**

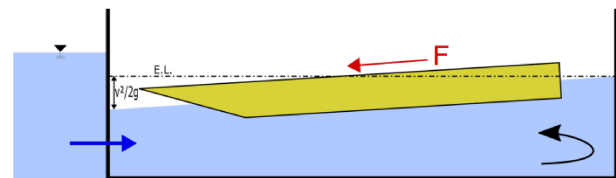
Bei der Planung und Optimierung von Schleusenfüllsystemen müssen im Wesentlichen drei Kriterien beachtet werden: Die Füllzeit sollte möglichst kurz sein, die Bau- und Betriebskosten sollten möglichst gering gehalten werden und zugleich muss die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt zu jeder Zeit gewährleistet sein. Die Sicherheit der zu schleusenden und in den Vorhäfen wartenden Schiffe ist dabei u.a. von den Kräften abhängig, die auf die Trossen der festgemachten Schiffe wirken. Beim schlagartigen Versagen einer solchen Trosse besteht Lebensgefahr für die Besatzung. Die wesentliche Schiffs kraft resultiert aus den unterschiedlichen Wasserständen entlang des Schiffes und kann als Hangabtriebskraft über das Wasserspiegelgefälle abgeschätzt werden. Durch zeitliche Veränderungen des Volumenstroms können Schwall- oder Sunkwellen in der Kammer entstehen, welche oszillierende Kräfte auf das Schiff in der Kammer verursachen. In den meisten Vorkopffüllsystemen erzeugt der erste Anstieg des Volumenstroms die maßgebliche Schiffs kraft während des Füllprozesses (vgl. Bild 1). Die wirkende Schiffs längskraft verhält sich dabei proportional zum zeitlichen Gradienten des Zuflussvolumenstroms. Anschließend ergibt sich durch die Abnahme der Fließgeschwindigkeit in der Kammer von Oberhaupt nach Unterhaupt ein Wasserspiegelgefälle in Richtung Oberhaupt, welches als statische Hangabtriebskraft in Richtung Oberhaupt auf das Schiff wirkt (vgl. Bild 2). Bei ungünstigen Vorkopffüllsystemen können Füllstrahlen, die direkt auf das in der Kammer liegende Schiff treffen, über den auftretenden Staudruck zusätzliche Kräfte auf das Schiff erzeugen.

Typischerweise steigen die wirkenden Schiffskräfte mit der Füllgeschwindigkeit und damit mit sinkender Füllzeit der Schleuse an. Die Kräfte können sowohl durch eine Optimierung des Füllsystems als auch der Füllstrategie verringert werden. Oft können dadurch die auf das Schiff wirkenden Längskräfte bei gleichbleibender Leistungsfähigkeit deutlich reduziert werden oder im Umkehrschluss kann bei gleichbleibenden Schiffskräften die Füllzeit verringert werden.

Bei der hydraulischen Bemessung der Schleusenfüllsysteme existieren in Deutschland keine verbindlich festgelegten Grenzwerte für die auf ein Binnenschiff wirkenden Kräfte während der Schleusung. An der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) werden für die Bemessung derzeit Grenzwerte für die Trossenkräfte verwendet, die sich an den Überlegungen von Partensky (1986) orientieren. Bei Schleusungsvorgängen wird die Trossenkraft auf 1/600 des Bruttoschiffgewichtes beschränkt (Partensky 1986). Daraus können zulässige Schiffskräfte abgeleitet werden: Für ein Gütermotorschiff (GMS) ergibt sich mit dieser Annahme beispielsweise eine maximal zulässige Längskraft von 23 kN, für ein überlanges Gütermotorschiff (üGMS) kann eine zulässige Längskraft von 30 kN extrapoliert werden.



*Bild 1: Wasserspiegelgefälle und resultierende Schiffskraft in Richtung Unterhaupt durch den ersten Anstieg des Volumenstroms.*



*Bild 2: Umkehrung des Wasserspiegelgefälles und der resultierenden durch die Abnahme der Fließgeschwindigkeit vom Oberhaupt zum Unterhaupt.*

Trotz grenzüberschreitender Flotten unterscheiden sich die in Deutschland in der Regel verwendeten Dimensionierungskriterien von denen der angrenzenden Staaten. So werden beispielsweise in den Niederlanden die maximal zulässigen Schiffskräfte verbindlich anhand der Schiffsgröße gemäß „Classification of European Inland Waterways“ (CEMT) bestimmt. Dabei wird in Abhängigkeit der Gewichtskraft des Schiffs zwischen verschiedenen Schiffsklassen unterschieden (PIANC 2015). Die maximal zulässige Längskraft bei Schleusen mit Nischenpollern beträgt für ein üGMS 0,85 ‰ der Gewichtskraft (hier: 29 kN) und bei Schleusen mit Schwimmpollern 1,15 ‰ der Gewichtskraft (hier: 39 kN). Mit der höheren zulässigen Schiffskraft in Schleusen mit Schwimmpollern wird die konstante Vorspannung der Trossen berücksichtigt. Von dieser kann ausgegangen werden, da hier das Nachfieren der Trossen während der Schleusung entfällt.

### **Aktualisierung der Dimensionierungskriterien**

Im Rahmen eines neuen Forschungs- und Entwicklungsvorhabens (FuE Vorhaben) an der BAW werden die bestehenden Kriterien für die Dimensionierung von Schleusen derzeit hinterfragt und überarbeitet. Ziel ist es, eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für die zukünftige Dimensionierung von Schleusen zu schaffen. Dafür soll eine Optimierungsstrategie in Anlehnung an moderne Sicherheitskonzepte entwickelt werden, um die Möglichkeiten für eine sichere und effiziente Schleusenfüllung aufzuzeigen.

Zunächst wurden vorhandene Daten zu bestehenden Schleusen analysiert, um einen Überblick über die Varianz der maßgebenden Eigenschaften bei den heute vorhandenen Bauwerken zu erhalten. Dieser Analyse wurden Daten aus der Wasserbaudatenbank „WaDaBa“ zugrunde gelegt.

Mit vergleichsweise geringem Bau- und Wartungsaufwand eignen sich für geringe Fallhöhen (<10 m) die sogenannten Vorkopf-Füllsysteme, welche die Schleusenammer vom Oberhaupt über Füllorgane befüllen. Für größere Fallhöhen werden üblicherweise komplexere Füllsysteme wie Seiten- oder Grundlaufsysteme eingesetzt, die durch die Vergleichmäßigung des einströmenden Wassers über die gesamte Kammerlänge größere Volumenströme als Vorkopffüllsysteme erlauben. Eine erste Analyse zeigt, dass der Großteil der Schleusen Fallhöhen <10 m aufweist und über ein Vorkopffüllsystem befüllt wird. Lediglich 27 % der Schleusen des Datensatzes verwenden eine komplexere Füllstrategie (Bild 3). Die Füllzeit der meisten Schleusen mit weniger als 10 m Hubhöhe beträgt zwischen 8 und 15 Minuten. Um diese zu erreichen werden die Schleusen mit einem mittleren Volumenstrom bis maximal 50 m<sup>3</sup>/s befüllt. Betrachtet man lediglich den mittleren Füllvolumenstrom der Vorkopffüllsysteme, so ergibt sich in Abhängigkeit von der Fallhöhe der in (Bild 4) gezeigte Zusammenhang.

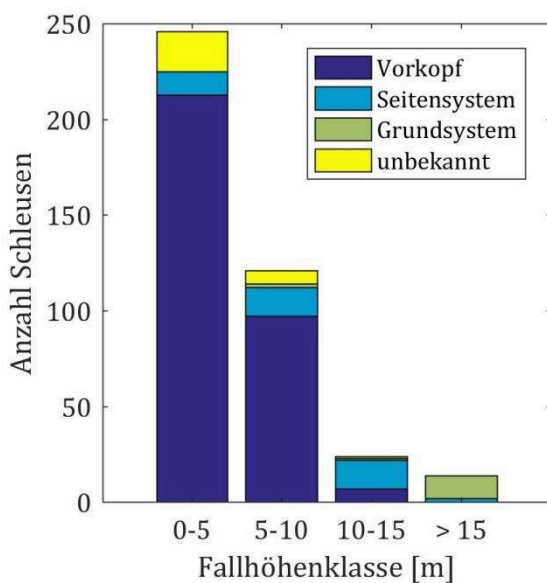


Bild 3: Verteilung der Füllsysteme in Abhängigkeit der Fallhöhe.

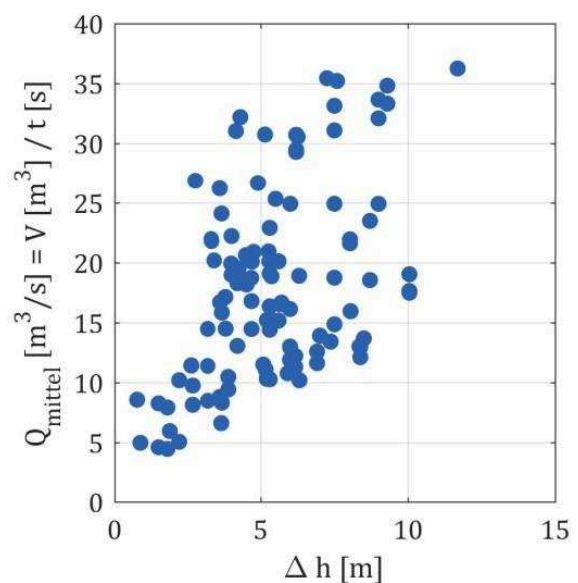


Bild 4: Mittlere Durchflussmenge in Abhängigkeit der Fallhöhe bei Vorkopffüllsystemen.

Obwohl die Schleusen mit gleichem Füllsystem ausgestattet sind, sind große Unterschiede in der mittleren Durchflussmenge bei gleichen Fallhöhen sichtbar. Diese große Varianz lässt sich mit den vorhandenen Informationen über die Schleusen nicht explizit begründen. Im Rahmen des FuE Vorhabens werden die Unterschiede und sich daraus ergebendes Optimierungspotential untersucht. Um die verwendeten Daten zu plausibilisieren und weiteres Detailwissen über bestehende Schleusenbauwerke und deren Betrieb zu sammeln, sind Befragungen von WSV-Mitarbeitern geplant. Die anonymisierten Daten sollen anschließend einer übergeordneten Optimierungsstrategie zugeführt werden. Des Weiteren können die gesammelten Daten auch für detaillierte Untersuchungen der hydrodynamischen Prozesse des Füllvorgangs in den verschiedenen Schleusenbauwerken genutzt werden, um bestehende Unterschiede und mögliches Optimierungspotential herauszuarbeiten.

Zur Untersuchung der hydrodynamischen Prozesse während einer Schleusung können analytische Ansätze, numerische Simulationen oder gegenständliche Modellversuche eingesetzt werden. Auch wenn gegenständliche Modelle zukünftig weiterhin eine wichtige Rolle bei der Optimierung des Füllsystems und der Füllstrategie spielen werden, ist die Verwendung numerischer Untersuchungsmethoden im Wasserbau essenziell.



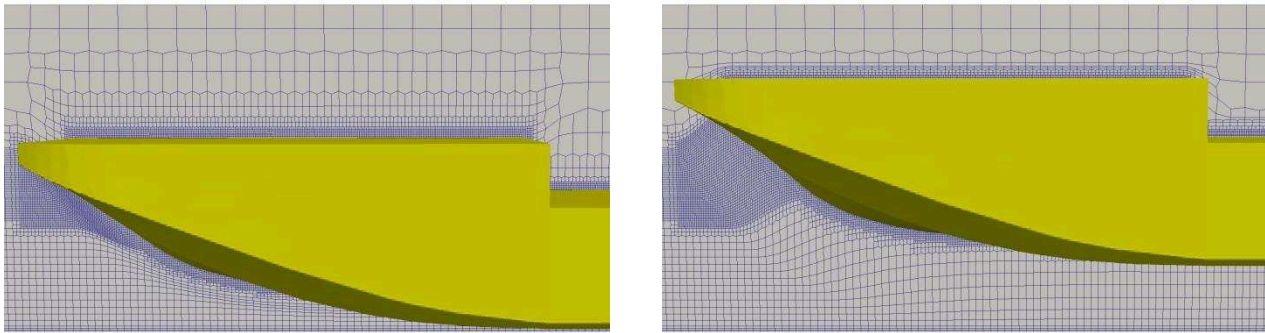
### 3D-numerische Modellierung von Schleusungsprozessen

Numerische Methoden, insbesondere dreidimensionale Verfahren, ermöglichen einen tiefgehenden Einblick in das vorhandene Strömungsfeld und die strömungsmechanischen Wechselwirkungen. Das Erreichen einer vergleichbaren Detailschärfe ist, wenn überhaupt möglich, bei gegenständlichen Modellen mit großem Messaufwand verbunden. Aus diesem Grund unterstützt die BAW Forschungsanstrengungen, die es ermöglichen sollen, Schleusungsprozesse mit dem in der BAW verwendeten Open-Source-Verfahren OpenFOAM® numerisch zu simulieren.

Eine Schiffsschleusung ist ein instationärer Prozess, der u. a. durch die Querschnittsfreigabe an den Füllorganen, einer Wasserspiegeländerung in der Schleusenkammer und der Ausbreitung von Wellen und Füllstrahlen charakterisiert wird. Das zu schleusende Schiff ist dabei diesen Strömungsphänomenen ausgesetzt und erfährt entsprechende hydraulische Krafteinwirkungen, die eine primäre Zielgröße der Simulation darstellen. Die größte Herausforderung des Modellierungsprozesses besteht allerdings in der Berücksichtigung der bewegten Objekte (Schütze und Schiff). Die Spanne der zu überwindenden Wasserspiegeldifferenzen liegt zwischen wenigen Metern an den deutschen Seeschleusen des Nord-Ostsee-Kanals und annähernd 38 Metern an der geplanten Schleuse Lüneburg. Dieser große vertikale Bewegungsumfang des Schiffes während der Schleusung bei gleichzeitig sehr geringer Distanz zwischen Schiffsrumpf und Kammerwand/-sohle macht individuelle Modellierungskonzepte notwendig. Die verschiedenen Methoden zur Berücksichtigung der Schiffsbewegung weisen spezifische Vor- und Nachteile auf. Die Unterschiede kommen einerseits in der Komplexität der Verfahren, andererseits in der Realisierbarkeit des tatsächlichen Bewegungsumfangs zum Ausdruck. Eine wesentliche Anforderung an alle Konzepte ist ein hohes Maß an Massenkonservativität, so dass der Zufluss in die Schleusenkammer allein durch die Öffnung der Füllorgane bestimmt wird. Dies ergibt sich aus dem eng begrenzten Volumen der Schleusenkammer und der Sensitivität der Schiffskräfte gegenüber Wasserspiegeldifferenzen entlang des Schiffsrumpfes. Derzeit werden an der BAW drei Methoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Aussagegenauigkeit getestet. Es handelt sich jeweils um Löser für die Simulation von Strömungen mit großflächiger freier Oberfläche, die auf den Volume-of-Fluid-Ansatz zurückgreifen. Alle Löser sind für einen massiv parallelen Betrieb auf Hochleistungsrechnern geeignet und können aufgrund der Open-Source-Umgebung an die individuellen Anforderungen des Anwenders angepasst werden.

Das Schiff wird bei der Modellierung als starrer Körper behandelt, dessen Freiheitsgrade in Anlehnung an ein vertäutes Schiff bzw. gemäß der Schiffskraftmessaanlage gegenständlicher Modelle eingeschränkt sind. Die Lösung der inkompressiblen mehrphasigen Navier-Stokes-Gleichungen liefert bei integraler Betrachtung der Druckwerte einen resultierenden Kraft- bzw. Drehmomentvektor für das Schiff. Unter Berücksichtigung der Schiffsmasse und des Trägheitsmomentes liegen nun alle Eingangsgrößen vor, um aus den Bewegungsgleichungen eine Translations- und Winkelbeschleunigung für das Schiff zu ermitteln. Die fluidinduzierte Objektbewegung ist in iterativer Weise mit der Lösung des Strömungsfeldes gekoppelt, um ein Gleichgewicht zwischen beiden Lösungsgrößen herzustellen.

Den elementarsten Ansatz unter den derzeit betrachteten numerischen Methoden zur Berücksichtigung von Starrkörperbewegungen stellt die Deforming-Mesh-Methode dar. Sie zeichnet sich durch einen überschaubaren Preprocessing-Aufwand, Robustheit und verhältnismäßig geringe Rechenzeiten aus. Der Grundgedanke dieser Methode ist es, dass Objekte durch ihre Bewegung das sie umgebende Berechnungsgitter verformen (Bild 5).



*Bild 5: Verformung des Berechnungsgitters durch die Hubbewegung des Schiffes während des Schleusungsprozesses.*

Mit zunehmendem Bewegungsumfang wächst jedoch auch der Grad der Gitterdeformation bis hin zu einem nicht funktionsfähigen Verzerrungszustand, worin der wesentliche Nachteil dieser Methode begründet ist. Weil das verformbare Gittergebiet durch den geringen Abstand zwischen Schiffsrumpf und Kammersohle im Verhältnis zum angestrebten Bewegungsumfang klein ist, bleibt der Anwendungsbereich dieser Methode auf Schleusen mit sehr geringer Hubhöhe beschränkt.

Die Gitterverzerrung ist primär auf die vertikale Hubbewegung des Schiffes zurückzuführen. Um dennoch Schleusungsprozesse mit großer Hubhöhe abbilden zu können, wurde eine Layer-Addition-Methode realisiert, die während der Laufzeit Topologieänderungen im Berechnungsgitter ermöglicht. Dabei wird das Berechnungsgitter in die Lage versetzt, ausgehend von einer horizontalen Ebene unterhalb des Schiffes durch das Einfügen ganzer Zellschichten zu wachsen. Auf diese Weise kann die maßgebende Vertikalbewegung des Schiffes realisiert werden, ohne starke Gitterverzerrungen hervorzurufen. Der wachsende Gitterbereich endet zwischen Schiffsbug und Schleusentor. Dort ist ein sogenanntes Sliding Interface definiert, das die relative Bewegung zwischen dem statischen und dem dynamischen Gitterareal ermöglicht. Der erweiterten Anwendbarkeit stehen jedoch deutlich erhöhte Preprocessing-Anforderungen, merklich gesteigerte Rechenzeiten und Stabilitätsprobleme entgegen, sodass dieser Ansatz bei der Modellierung von Schleusungsprozessen möglicherweise zugunsten fortschrittlicherer Methoden nicht weiter verfolgt werden wird.

Eine weitere Methode ist die Overset-Mesh-Methode. Sie ermöglicht es, für das bewegliche Objekt ein körperangepasstes Berechnungsgitter zu erzeugen, das anschließend mit dem gebietsbeschreibenden Hintergrundgitter überlagert werden kann. Beide Gitter können sich relativ zueinander bewegen, während die Feldgrößen über ein Interpolationsschema zwischen den Gitterregionen ausgetauscht werden. Damit ist der Bewegungsumfang des Schiffes im Rahmen des Hintergrundgitters beliebig. Allerdings ist der Aspekt der Massenkonservativität kritisch zu prüfen. Derzeit werden an der BAW alle drei beschriebenen Methoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Aussagegenauigkeit untersucht.

Ein weiteres, viertes Verfahren – die Immersed-Boundary-Methode – befindet sich aktuell in der Entwicklung und wird zukünftig den Bestand der zur Verfügung stehenden Methoden zur Einbindung bewegter Objekte in die 3D-numerische Modellierung von Schleusungsprozessen ergänzen.

## **Ausblick**

Sowohl die Entwicklung der Methoden der dreidimensionalen Modellierung von Schleusungsprozessen als auch die Überarbeitung der Dimensionierungskriterien soll es zukünftig ermöglichen Planungen zu optimieren und Planungsziele zu bewerten. Auch bestehende Schleusen können damit überprüft und ggf. effizienter betrieben werden. Die Weiterentwicklung der bereits bestehenden Methoden und die Entwicklung neuer Methoden ist dabei stets eng verknüpft mit der Validierung an Labormodellen oder Naturmessungen, so dass trotz neuer Simulationsmethoden der Bereich des wasserbaulichen Versuchswesens als klassische Methode bei der Beurteilung von Schleusungsvorängen weiter eine große Bedeutung hat. Neue Entwicklungen können in der Projektarbeit erst dann eingesetzt werden, wenn diese entsprechend validiert sind und seitens der Bearbeiter genügend Erfahrung besteht, so dass die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt zu jedem Zeitpunkt garantiert ist.

## **Literatur**

BMVI (2016): Verkehrsinfrastrukturbericht 2016 - Auszug Wasserstraßen. Online verfügbar unter <http://www.vbw-ev.de/en/service/download/documents/item/bmvi-verkehrsinfrastrukturbericht-2016-auszug-wasserstrassen.html>.

Partenscky, H.-W. (1986): Binnenverkehrswasserbau. Schleusenanlagen. Berlin Heidelberg NewYork Tokyo: Springer.

PIANC (2015): PIANC InCom WG 155. Ship Behaviour in Locks and Lock Approaches. Unter Mitarbeit von C. Thorenz, D. Bousmar, J.-P. Dubbelman, J. Li, Spitzer D., J. J. Veldman et al. Hg. v. PIANC.

## **Numerische Modellierung zur Untersuchung strömungsinduzierter Schwingungen im Stahlwasserbau**

Georg Göbel M. Sc., Bundesanstalt für Wasserbau

Dr.-Ing. Michael Gebhardt, Bundesanstalt für Wasserbau

Dipl.-Ing. (FH) Walter Metz, Bundesanstalt für Wasserbau

Dipl.-Ing. Martin Deutscher, Bundesanstalt für Wasserbau

### **Einleitung**

Im Wasserbau, insbesondere im Stahlwasserbau, besteht häufig die Gefahr von strömungsinduzierten Schwingungen. Das kann elastische Dichtungen, Füllschütze, Schleusentore oder Wehrverschlüsse betreffen. Grundsätzlich können dabei alle elastischen oder elastisch gelagerten Teile ein schwingfähiges System darstellen. Schwingungen können je nach Konstruktion, Strömungsverhalten und Betriebszustand auftreten. Kurzfristig auftretende Schwingungen an Schleusen oder Wehranlagen beeinträchtigen einerseits den Betrieb durch Lärm oder Wellenbildung. Andererseits können dynamischen Lasten, welche durch Schwingungen eingetragen werden, die statischen Lasten um ein Vielfaches übersteigen, was in der Bemessung meist nicht berücksichtigt wird. Häufige oder lang andauernde Schwingungen können durch Ermüdungsbeanspruchung die sichere Nutzungsdauer von Stahlwasserbauten deutlich herabsetzen.

Trotz intensiver Forschungen (u.a. Naudascher und Rockwell 1994 und Kolkman und Jongeling 2007) gibt es im Wasserbau nach wie vor Schwingungsprobleme. Das kann damit zusammenhängen, dass sich die Konstruktionsprinzipien im Stahlwasserbau im Laufe der Jahrzehnte weiterentwickelt und sich damit auch die Ursachen für strömungsinduzierte Schwingungen geändert haben. So sind beispielsweise Querschnittsformen von Sohlbalken zur Schwingungsvermeidung heute nahezu irrelevant, da Holzdichtungen praktisch nicht mehr eingesetzt werden. Doch auch bei Elastomer-Dichtungen muss neben einem hohen Maß an Dichtheit auch die Schwingungsgefahr beachtet werden. Aus wirtschaftlichen Gründen sowie aufgrund des technologischen Fortschrittes im Stahlbau werden Stahlwasserbaukonstruktionen tendenziell leichter (Büsching 1985) und ändern dadurch ihr Schwingverhalten. Verschlüsse mit Fachwerkstrukturen neigen dazu, sich bei Hochwasser mit Treibgut zu versetzen. Dadurch entstehen nicht nur zusätzliche Lasten, sondern auch ein erhöhter Unterhaltungsaufwand. Aus diesem Grund wird heutzutage die Aussteifung von großen Verschlüssen häufig mit Hohlkästen anstatt mit Fachwerkstrukturen vorgenommen. Wenn dann bei Unterströmung fluktuierende Druckschwankungen auftreten, bieten Hohlkästen im Allgemeinen eine größere Angriffsfläche als Fachwerke.

Im Zuge der Automatisierung von Wehranlagen gewinnt das Thema Schwingungen weiter an Bedeutung. Während das Personal vor Ort bei eventuell auftretenden Schwingungen zeitnah reagieren und Gegenmaßnahmen ergreifen kann, werden die Schwingungen im ferngesteuerten oder automatisierten Betrieb unter Umständen gar nicht bemerkt. Schwingungen können dabei über längere Zeit andauern und erhebliche Schäden verursachen. In jedem Fall wird die Lebensdauer der Anlage durch die hohe Anzahl von Lastzyklen deutlich herabgesetzt. Es gilt also, bestehende oder geplante Betriebskonzepte und Konstruktionsweisen auf schwingungsgefährdete Zustände hin zu untersuchen.

Bei Bedarf können Änderungen vorgenommen werden, so dass Schwingungen in Dauer und Amplitude reduziert, im Idealfall auch vollständig unterbunden werden.

### **Funktion der numerischen Werkzeuge**

Das Open-Source Softwarepaket OpenFOAM® bietet dem Anwender ein umfangreiches Angebot an Lösern für verschiedene strömungsmechanische Problemstellungen. Durch seine Offenheit stellt es außerdem eine gute Basis für Anpassungen und Weiterentwicklungen dar. In der BAW wird OpenFOAM® seit mehreren Jahren erfolgreich zur Untersuchung bauwerkshydraulischer Fragestellungen genutzt.

Der Löser interDyMfoam ist geeignet für die Lösung von Problemen aus dem Bereich der Fluid-Festkörper-Interaktion. Die Simulation von Strömungen mit freier Oberfläche basiert auf der Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen (NSG) für inkompressible Fluide. Mithilfe der Volume-of-Fluid-Methode (VoF) kann für jede Zelle bestimmt werden, wie groß der Anteil von Luft und Wasser am Zellvolumen ist. Für bewegte Festkörper stehen verschiedene Bewegungseinschränkungen zur Verfügung. So können einerseits Freiheitsgrade durch Auflagerbedingungen unterdrückt werden. Andererseits kann die Bewegung durch Federn mit der Steifigkeit  $k$  [N/m] und Dämpfer mit der Dämpfungskonstante  $d$  [Ns/m] beeinflusst werden. Die Bewegung kann durch Gleichung [1] beschrieben werden.

$$k \cdot x + d \cdot \dot{x} + m \cdot \ddot{x} = F_{Hyd} \quad [1]$$

Der in interDyMfoam verwendete Löser bestimmt mit einem Leapfrog-Verfahren abwechselnd die Position  $x$  [m] und die Geschwindigkeit  $\dot{x}$  [m/s] in Abhängigkeit von der Beschleunigung  $\ddot{x}$  [m/s<sup>2</sup>], welche in einem Zwischenschritt über das Kräftegleichgewicht am Körper gelöst wird (Devolder et al. 2015). Die äußeren hydraulischen Kräfte  $F_{Hyd}$  werden aus den Druck- und Reibungskräften auf dem Rand des Körpers bestimmt. Ist die Bewegungsgleichung gelöst, wird der Körper verschoben, was eine Deformation des Rechengitters zur Folge hat (Bild 1). Durch die Verschiebung des Festkörpers verändert sich das Strömungsgebiet und somit das Ergebnis des Strömungslösers, was eine iterative Lösung innerhalb eines Zeitschrittes erforderlich macht. Die abwechselnde Lösung von Strömung und Festkörperbewegung muss so lange wiederholt werden, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Gegenüber einer Simulation ohne bewegte Festkörper multipliziert sich die Rechenzeit mit der Anzahl der Iterationen pro Zeitschritt. Je nach Anwendungsfall sind bis zu 20 Iterationen notwendig, um ein stabiles Ergebnis zu erhalten.



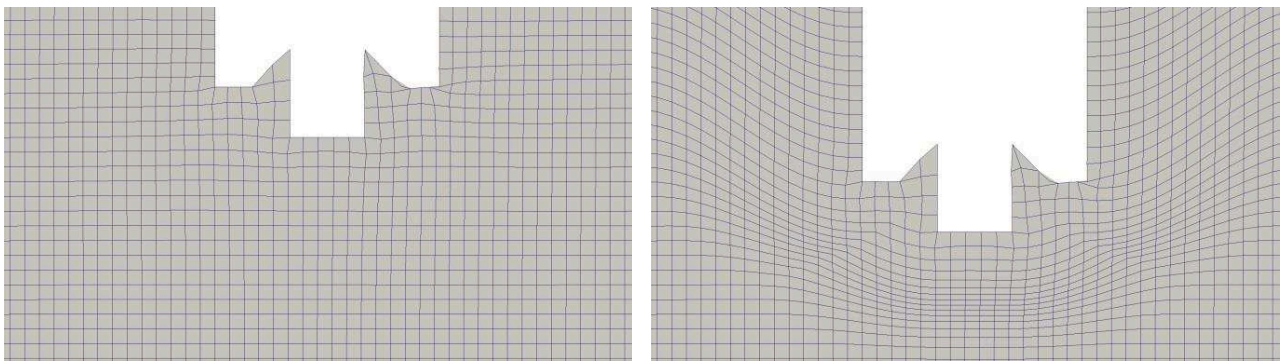


Bild 1: Links: Rechengitter im Ausgangszustand. Rechts: Rechengitter nach Verschiebung des Festkörpers nach unten.

### Modellbildung

Wehrverschlüsse weisen oft sehr große Spannweiten auf. Eine häufig vorkommende Wehrfeldbreite an Bundeswasserstraßen ist 30 m, bei der Schütze, Walzen- oder Segmentverschlüsse eingesetzt werden. Es gibt aber auch Wehrfelder mit Breiten bis etwa 45 m. Aufgrund der seitlichen Lagerung in den Wehrnischen können Schütze als Biegebalken betrachtet werden, welche in erster Eigenform schwingen. Diese Verformung kann mit interDyMFoam nicht abgebildet werden, weswegen das mechanische Modell zu einem Einmassenschwinger vereinfacht werden muss (Bild 2).

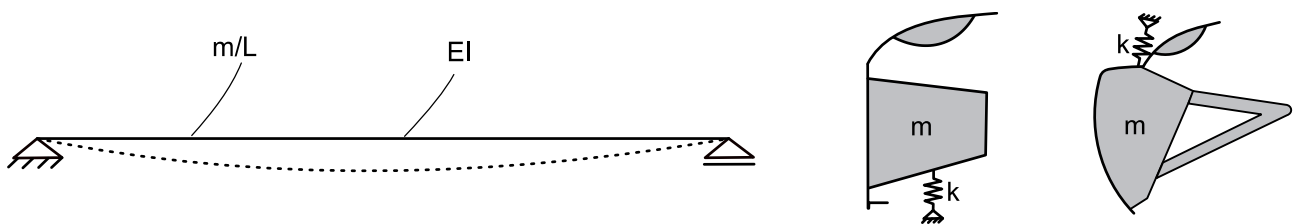


Bild 2: Schematische Darstellung eines Biegebalkens in erster Eigenform sowie Quasi-2D-Modelle eines Hubschützes mit Aufsatzklappe und eines Segmentverschlusses mit Aufsatzklappe.

Die Biegesteifigkeit  $EI$  [ $\text{Nm}^2$ ] und die kontinuierliche Masse  $m/L$  [ $\text{kg/m}$ ] müssen in eine diskrete Masse  $m$  [ $\text{kg}$ ] und eine Federsteifigkeit  $k$  [ $\text{n/m}$ ] umgerechnet werden. Der Zusammenhang zwischen  $k$  und  $m$  ist über die Eigenfrequenz  $f_0$  [ $\text{Hz}$ ] gegeben:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [2]$$

Die vertikale Durchbiegung eines Schützes führt dazu, dass der durchströmte Spalt über die Wehrfeldbreite nicht konstant ist und sich fluktuierende Druckänderungen nicht in gleichem Maße auf die Schützunterkante auswirken. Da sich bei kleinerer Spaltbreite stärkere Druckfluktuationen einstellen, ist die anfachende Kraft im 2D-Modell tendenziell größer. Dies muss bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden. Bei Segmentverschlüssen hingegen schwingt der Verschluss um seine Drehachse und die Verformung spielt für die fluktuierende Spaltweite eine untergeordnete Rolle. In diesem Fall fällt die Betrachtung als Einmassenschwinger leichter, da keine Vereinfachung der Biegeform getroffen werden muss.

Die Reduzierung auf ein 2D-Modell ist im Allgemeinen möglich, weil das dominante Strömungsbild bei breiten Verschlüssen einen 2-dimensionalen Charakter hat und Randeinflüsse, wie zum Beispiel durch Pfeilernischen, vernachlässigt werden können. Mit einem 2D-Modell ergeben sich einige Vorteile. Gerade bei unterströmten Verschlüssen mit Öffnungsweiten von wenigen Zentimetern, muss das Rechengitter unter der Schützkante sehr fein sein. Diese feine Gitterstruktur auf einer Breite von bis 45 m durchzuführen führt zu Zellmengen, welche mit der zur Verfügung stehenden Rechenleistung nicht verarbeitet werden können. Die Erfahrungen zeigen, dass die Simulationsergebnisse mit einem reduzierten mechanischen Modell und einer zweidimensionalen Strömungssimulation die Realität sehr gut abbilden.

Einschränkungen bei der Verwendung von 2D-Strömungsmodellen ergeben sich allerdings bei der Wahl des Turbulenzmodells. Die Anwendung wirbelauflösender Methoden (beispielsweise Large Eddy Simulation) ist nicht möglich, da diese nur in dreidimensionalen Strömungsgebieten funktionieren. Aus diesem Grund müssen zur Turbulenzmodellierung RANS Modelle (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) verwendet werden.

Schwer abzuschätzen ist die mechanische Dämpfung des Systems. Im Falle eines Biegebalkens kann davon ausgegangen werden, dass die innere Dämpfung im Verhältnis zu den hydraulischen Effekten des umgebenden Wasser vernachlässigbar klein ist. Schwingt ein Segmentschütz um seine Lagerpunkte, kommt es durch die Reibung entlang der Seitendichtungen zu einer stärkeren Dämpfung. Diese quantitativ abzuschätzen ist allerdings nur schwer möglich.

### **Anwendung**

An einem unterströmten Hubschütz mit Aufsatzklappe konnten bei geringem Abfluss und kleiner Hubhöhe starke Schwingungen festgestellt werden (Bild 3 links). Durch Messungen vor Ort konnte eine Biegeschwingung, wie in Bild 2 dargestellt, mit einer Frequenz von  $f_0 = 1,5$  Hz bestimmt werden. Zur Analyse der Schwingungsursachen wurde um den Querschnitt, wie im Abschnitt ‚Modellbildung‘ beschrieben, ein quasi-2D-Rechengebiet aufgebaut. Hierzu wurde die Schnittebene vollständig diskretisiert. Das Gebiet hat dabei senkrecht zur Schnittebene nur eine Rechenzelle mit einer Breite von 1 m. Strömungsgrößen und deren Gradienten in dieser Richtung werden allerdings nicht ermittelt. Die Gesamtmasse des 42m breiten Verschlusses wurde auf  $1/42$  reduziert. Die Federsteifigkeit wurde so kalibriert, dass die Eigenfrequenz bei Unterströmung  $f_0 = 1,5$  Hz betrug.

Im Rahmen der Untersuchung wurden die Öffnungsweite sowie der Unterwasserstand variiert. Der Oberwasserstand wurde konstant auf Stauziel gehalten. Da die Schwingungen nur bei Unterströmung auftraten, wurden keine Zustände mit Überströmung betrachtet. Als Zielgröße der Untersuchung wurde der Dämpfungsgrad  $\xi$  gewählt. Für gedämpfte Schwingungen ist  $\xi$  positiv, für angefachte Schwingungen negativ. Die Ergebnisse der Untersuchung für insgesamt 25 Zustände sind in Tabelle 1 dargestellt.



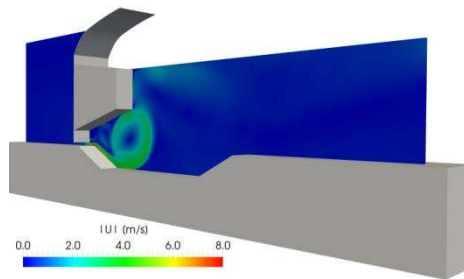


Bild 3: Links: durch Biegeschwingung hervorgerufene stehende Welle im Oberwasser eines Hub-schützes mit Aufsatzklappe. Rechts: Geschwindigkeitsverteilung im abgeleiteten 2D-Modell.

Tabelle 1: Dämpfungsgrad  $\xi$  in Abhängigkeit von Öffnungsweite  $s$  und Fallhöhe  $\Delta H$ .

$s$ [m]	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150
$\Delta H$ [m]	Dämpfungsgrad $\xi$ [-]				
3,44	-0,0303	-0,0103	-0,0486	-0,0043	0,0136
2,94	-0,0178	-0,0088	-0,0648	0,0006	0,0371
2,44	-0,0136	-0,0034	-0,0080	0,0052	0,0418
1,94	-0,0071	0,0031	0,0035	0,0364	0,0331
1,44	-0,0015	0,0107	0,0087	0,0215	0,0356

Es zeigt sich eine starke Abhängigkeit des Dämpfungsgrades von Fallhöhe und Öffnungsweite. Der Dämpfungsgrad nimmt mit zunehmender Öffnungsweite und abnehmender Fallhöhe zu, die Schwingungsgefahr sinkt somit ab. Dabei ist zu beachten, dass die Vereinfachung zum Einmassenschwinger und die Zweidimensionalität des Strömungsgebietes zu Ungenauigkeiten im Ergebnis führen können.

Vereinfacht lässt sich die Ursache für die Schwingung über die Trägheit des Durchflusses erklären. Wird das Schütz nach unten ausgelenkt, so verkleinert sich die durchströmte Fläche. Der Durchfluss bleibt aber zunächst nahezu konstant, was zu einer Zunahme der Fließgeschwindigkeit und einer Verringerung des Druckes unter dem Schütz führt. Es entsteht also eine Kraft in Bewegungsrichtung, welche die Schwingung anfacht. In der Literatur (z.B. Naudascher und Rockwell 1994) wird dieses Phänomen oftmals als Press-Shut-Mechanismus bezeichnet.

Die im numerischen Modell beobachtete abnehmende Schwingungsanfachung bei steigendem Unterwasserstand wurde bei einer Messkampagne bestätigt. Somit können die Ergebnisse der Simulationen verwendet werden, um Fahrpläne von Wehranlagen auf ihre Schwingungsgefahr hin zu bewerten (Göbel 2017). Im vorliegenden Fall zeigte sich auch, dass Schwingungen durch betriebliche Maßnahmen, z.B. das Vermeiden kleiner Öffnungsweiten, vermieden werden können. In der Praxis treten diese Betriebszustände im Normalbetrieb der betrachteten Anlage nicht auf. In der Regel wird Niedrig- und Mittelwasser über die Klappen abgeführt, da somit das Stauziel genauer eingehalten werden kann. Erst wenn die Abflussleistung der Klappen nicht mehr ausreicht, werden die Schütze angehoben. Dann ist der Unterwasserstand bereits angestiegen und die anzufahrenden Öffnungsweiten liegen außerhalb des schwingungsgefährdenden Bereichs.

## **Ausblick**

Die Untersuchungen zeigen, dass numerische Methoden zur Fluid-Struktur-Kopplung ein effizientes Werkzeug sein können, um Schwingungsphänomene im Stahlwasserbau zu analysieren. Strömungsgeschwindigkeiten und Drücke können kontinuierlich an beliebiger Stelle ausgegeben und analysiert werden, um damit das Verständnis der Anfachungsmechanismen zu vertiefen und schließlich Verbesserungsvorschläge zu erarbeiten. Damit können bestehende Theorien zu strömungsinduzierten Schwingungen, wie sie zum Beispiel in Naudascher und Rockwell (1994) oder Kolkman und Jongeling (2007) beschrieben sind, weiterführend untersucht, bestätigt oder erweitert werden.

## **Literatur**

- Büsching, F. (1985): Schwingungsanregung eines Schiebetores infolge Undichtigkeit am Drempe. In: *Bauingenieur* (60), S. 109–111.
- Devolder, Brecht; Schmitt, Pál; Rauwoens, Pieter; Elsaesser, Björn; Troch, Peter (2015): A Review of the Implicit Motion Solver Algorithm in OpenFOAM to Simulate a Heaving Buoy. In: Volker Bertram und Emilio F. Campana (Hg.): Proceedings of the 18th Numerical Towing Tank Symposium (NuTTS 2015). Marstrand, Sweden, 20 - 30 September 2015.
- Göbel, Georg (2017): Numerische Simulation strömungsinduzierter Schwingungen im Stahlwasserbau. In: Jürgen Jensen (Hg.): Tagungsband. 19. Treffen junger WissenschaftlerInnen deutschsprachiger Wasserbauinstitute. Siegen, 23. - 25. August 2017. Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen, S. 53–56.
- Kolkman, P. A.; Jongeling, T. H. G. (2007): Dynamic behaviour of hydraulic structures. Delft: WL|Delft Hydraulics publication (Hydraulic Engineering Reports).
- Naudascher, Eduard; Rockwell, Donald (1994): Flow-induced vibrations. An engineering guide. Rotterdam: A.A. Balkema (IAHR series of Hydraulic Structures Design Manuals, Volume 7).

## **Digitalisierung in der Binnenschifffahrt**

Prof. Dr.-Ing. Bettar O. el Moctar, Universität Duisburg Essen

### **Einleitung**

Der folgende Beitrag basiert weitestgehend auf internen Stellungnahmen des DST und dem Bericht der Arbeitsgruppe „Schifffahrt“ des BMWI-Forschungsprogramms „F&E-Maritime Technologien“. Der letztgenannte Bericht wurde führend vom Autor mitverfasst.

Zuverlässiger, sicherer und umweltverträglicher Verkehr ist eine elementare Voraussetzung für eine wettbewerbsfähige und nachhaltige Wirtschaft und für wirtschaftliche Prosperität Deutschlands und Europas. Dabei kann und soll die Binnenschifffahrt eine wichtige Rolle innerhalb des Gesamtverkehrssystems einnehmen: Durch eine intelligente Verknüpfung der Verkehrsträger kann sie wertvolle Beiträge zur Behebung von Engpässen leisten und zur Entlastung (und Stärkung) des Gesamtsystems beitragen.

Die Binnenschifffahrt steht im täglichen Betrieb einer Vielzahl sich stark ändernder Randbedingungen und Herausforderungen gegenüber. Dazu gehören einerseits die örtlichen und zeitlichen Änderungen der Tiefen und Strömungsverhältnisse, beengte Fahrwasserverhältnisse, also enge Querschnitte, geringe Kurvenradien, Höheneinschränkungen durch Brücken. Diese Randbedingungen werden in von der Beschaffenheit der Wasserstraße, den Witterungsbedingungen und Bebauungen aufgeprägt. Andererseits entstehen zunehmend hohe Verkehrsaufkommen bei wachsenden Schiffsgrößen, welche zu Engstellen führen und eine potenzielle Gefährdung darstellen.

Insgesamt soll die Binnenschifffahrt in Bezug auf Wirtschaftlichkeit, Sicherheit, Zuverlässigkeit und Umweltverträglichkeit gestärkt werden, um sowohl in Bezug auf die spezifischen Randbedingungen wirtschaftlich attraktiv, als auch gegenüber anderen Verkehrsträgern konkurrenzfähig zu sein. Unabhängig von der Konkurrenzsituation, sind für die Weiterentwicklung des Wirtschaftsstandortes. Deutschland insgesamt leistungsfähige Verkehrsträger erforderlich, welche in ihrer Summe dem steigenden Transportbedarf gerecht werden. Die Digitalisierung der Binnenschifffahrt kann hier einen wichtigen Beitrag leisten und birgt Chancen.

Die Schifffahrt befindet sich wie andere Wirtschaftsbereiche in einer digitalen Transformation, die insbesondere auf die fortschreitende und durchgehende Digitalisierung und Automatisierung im Schiffs- und Landbetrieb abzielt. Eine Herausforderung besteht darin, neue intelligente und autonome Technologien und IT-basierte Entwicklungen zur zielorientierten Bewertung der Situation und dessen vorausschauender (automatischen bzw. ferngesteuerten) Beeinflussung marktreif zu etablieren.

Die Digitalisierung der Systeme an Bord sowie die Kommunikation und Vernetzung nach außen erfordert neue Denkweisen in der Handhabung von Daten. Es gilt, effiziente Algorithmen für die Auswertung großer Datenmengen („Big Data“) zu entwickeln. Eine wesentliche Herausforderung besteht darin, die gesammelten Daten zu verifizieren und aus denen die richtigen Schlüsse zu ziehen. Vernetzte Systeme bieten immer auch Angriffspunkte, welche sehr unterschiedliche Auswirkungen haben. Hierzu zählen die Gefährdung der Sicherheit und des Betriebs von Schiffen, der Kontrollverlust über einzelne Komponenten bis hin zu gesamten Plattform, Systemstörungen mit wirtschaftlichen Folgen für den Betreiber und unerwünschter Zugriff auf sensible Daten.

Die Cyber-Security, Betriebsgeheimnis und Datenschutz werden einen großen Einfluss auf die technische Umsetzung digitaler Maßnahmen haben. Andererseits ist der Datenaustausch (z.B. zwischen Schiff und Reederei sowie Reederei und Hafen) für die Optimierung des Produktes und der Logistikkette entscheidend.

### **Assistenzsysteme**

Ein wichtiges Instrument der Digitalisierung in der Binnenschiffahrt stellen Assistenzsysteme dar. Denn eine effektive Nutzung der Wasserstraßen erfordert die Entwicklung geeigneter Assistenzsysteme, welche richtungsabhängig (also für Berg- und Talfahrt) sowie unter Berücksichtigung örtlich und zeitlich variabler Strömungsbedingungen Energie- und Ressourcenschonende Fahrzustände, Unfallrisiken und die optimale Bahnlinie ermittelt und in Interaktion mit dem Autopiloten umsetzt. Ziel dieser Assistenzsysteme sollte die Verbesserung der Energieeffizienz der Binnenschiffe durch eine intelligente Wahl von Bahn und Geschwindigkeit, die effiziente Nutzung der Wasserstraße und schließlich die Vermeidung bzw. Reduktion von Schiffsunfällen sein. Hierbei ist selbstverständlich die individuelle technische Charakteristik eines Schiffes zu berücksichtigen. Der Aspekt der effizienten Nutzung des vorhandenen Platzes der Fahrrinne unter Berücksichtigung der lokalen Umgebungsbedingungen ist bei der Weiterentwicklung der Wasserstraße von besonderer Bedeutung.

Bedingt durch jahreszeitlich periodische sowie unregelmäßige wetterbedingte Änderungen der Wassertiefe und Sohldynamik unterliegen die Befahrbarkeit der Binnenwasserstraßen und die maximale Abladung der Schiffe Schwankungen. In Verbindung mit Assistenzsystemen an Bord und Verkehrsleitsystemen ist eine Ermittlung und Verringerung des Risikos für Kollisionen möglich. Als mögliche Datengrundlage für Befahrbarkeitsanalysen wird der Ausbau der Datenerhebung an Bord von Schiffen betrachtet. Heute schon verfügen die Schiffe über eine Vielzahl an Sensorik und übertragen einige Daten per AIS. Weiterentwicklung der Systeme, Konsolidierung, Verifizierung und Nutzung der Daten sind mögliche Grundpfeiler zukünftiger Assistenz- und Leitsysteme, da sie die Messkapazität der Sensoren und das Fahrverhalten der Schiffsführer zur Verbesserung des gesamten Binnenschiffsverkehrs nutzbar machen. Wichtig ist dabei auch eine Betrachtung der datenschutzrechtlichen Bedingungen. Das anzustrebende Fernziel sollte so sein, dass die Schiffe durch ihre Fahrten und Rückmeldungen an entsprechende Zentralen die Analyse der Fahrdaten und Gewässerparameter ermöglichen, die Verkehrsplanung auf dieser Basis stattfindet und letztlich die Schiffe von besserer Zuverlässigkeit, Zeitplanung, Wirtschaftlichkeit und ökologischer Fahrweise profitieren. Unfälle mit Personen und Kapital Schaden, z.B. Waldhof, haben kaum Akzeptanz in der Gesellschaft. Abgesehen von dem Verlust menschlichen Lebens kann der volkswirtschaftliche Schaden sehr groß sein. Jeder Unfall geht mit einem Image-Schaden für den Verkehrssektor einher und wirft Fragen nach der Vermeidung weiterer Unfälle auf. Während Assistenzsysteme zur Überwachung von Beladung, Seeverhalten auf Seeschiffen bereits nahezu Standard sind, ist deren Verbreitung auf Binnenschiffen noch relativ gering bis nicht vorhanden. Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Warnsysteme zur Vermeidung von Unfällen, insbesondere in Zusammenhang mit Stabilitätsproblemen bei flüssiger Ladung, Manövern und Schiffsbegegnungen könnte einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit und der Reduktion von Unfällen leisten.

Allgemein ist davon auszugehen, dass Assistenzsysteme auf Binnenschiffen in Zukunft verstärkt zum Einsatz kommen. Dies zeichnet sich bereits ab.

## **Intelligente Systeme und Anlagen und autonomes Fahren**

Es gibt unterschiedliche Bereiche im Schiffsbetrieb, in denen der Einsatz von intelligenten Systemen sinnvoll erscheint. Als Beispiel ist die Fernüberwachung von Kühlcontainern zu nennen. Erste Systeme erlauben es, den Betrieb der einzelnen Container zu verfolgen und ggf. Störungen zu erkennen und geeignete Maßnahmen zu deren Behebung zu ergreifen. Zudem kann die Wartung dieser Einheiten nach Bedarf, sprich: nur im Falle eines technischen Problems erfolgen. Weiterentwicklungen im Bereich der Systemdiagnostik sowie in den Kommunikations- und Auswertungssystemen, um zuverlässig Fehler- und Kontrollanalysen zu erhalten.

Die Weiterentwicklung des automatisiert bedarfsgeregelten Maschinenbetriebs bzw. Schiffsbetriebs, der ein wirksames Energiemanagementsystem für effiziente und emissionsgeführte Betriebsstrategien integriert, erscheint ebenso sinnvoll.

Teilautonomes Fahren ist mittlerweile in der Automobilindustrie weitfortgeschritten. Bis zum Einsatz vollautonomer Fahrzeuge wird es sicher noch dauern. Die Herausforderungen für autonome Binnenschiffe sind aufgrund der (im Vergleich zu der Seeschifffahrt) relativ hohen Verkehrsdichte sind hoch. Kurz- bzw. mittelfristig scheint mir das teilautonome Fahren von Binnenschiffen denkbar. Hier kann die Binnenschifffahrt von den Entwicklungen in der Automobilindustrie profitieren. Teilautonomes Fahren kann die Auslastung des Personals an Bord verringern, wodurch Personaleinsparungen denkbar sind und bei arbeitendem Personal die Aufmerksamkeit auf andere Bereiche des Schiffsbetriebs gelegt werden können (Reduktion von Risiken).

## **Schiffsführungssimulation**

Bei der Aus- und Weiterbildung von Schiffsführern und Lotsen, der Untersuchung von Unfällen und der Analyse der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen und Häfen können Schiffsführungssimulatoren einen wichtigen Beitrag leisten. Sie ermöglichen die virtuelle Durchführung von Fahrten ohne reales Schadensrisiko. Varianten für Manöver, architektonische Gegebenheiten und Schiffskonfigurationen können ebenfalls untersucht und bewertet werden. Die Voraussetzung ist allerdings eine ausreichende Abbildung der physikalischen Prozesse in der Großausführung im Simulator. Insbesondere in Bezug auf die Manövriereigenschaften von Schiffen, die Abbildung von Manövrierorganen, der Gewässermodellierung und der Interaktion zwischen Schiffen sowie Schiffen und Wasserstraßen sind Entwicklungen notwendig. Des Weiteren ist die Entwicklung von Modellen für gekoppelte Verbände sowie Modellen für die Analyse von Kollisionen von hoher Bedeutung. Die Forschung wird zu einer Verbesserung der Modelle und folglich zu präziseren Analysen mittels der Simulatoren führen.

## **Datenmodelle**

Die Anwendung digitaler Systeme und Modelle geschieht bisher in der Regel getrennt für die Bereiche Entwurf/Konstruktion, Realbetrieb und Simulatorbetrieb. Es besteht Forschungsbedarf zur Entwicklung von Technologien zur Nutzung durchgängiger Datenmodelle, welche in allen Bereichen anwendbar sind. Dies dient zur besseren Interaktion der einzelnen Bereiche und vereinfacht, insbesondere in Bezug auf die Konstruktion eine direkte Rückkopplung der Betriebserfahrungen auf die Konstruktion weiterer Schiffe. Betrachtet man die gespeicherten Daten aus dem Betrieb von Schiffen und Offshore-Anlagen als „Erfahrung“, wäre durch die Rückkopplung die Entwicklung „Erfahrungsbasierter Konstruktionsmethoden“ denkbar.

## **Literatur**

Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme DST (2010-2016): Interne Berichte DST.

Bericht der Arbeitsgruppe "Schifffahrt" des BMWI-Forschungsprogramms „F&E Maritime Technologien“ (2016).



## **Ökologische und ökonomische Betrachtungen zur Binnenschifffahrt am Beispiel der EU-Projekte MoVe IT! und PROMINENT**

D. Sc. Juha Schweighofer, via donau – Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH

### **Einleitung**

In unserer Welt spielt Umweltfreundlichkeit eine immer größere Rolle. Dies ist am besten durch die stets strenger werdende Umweltgesetzgebung und Einführung lokaler Umweltstandards demonstriert. Umweltfreundlichkeit stellt heutzutage eine der Grundvoraussetzungen für den Erhalt von Förderungen (z.B. Motorenförderung in Deutschland), Bereitstellung von Mitteln für die Verkehrsinfrastruktur und eventuell die Wahl eines Verkehrsträgers dar.

Die Binnenschifffahrt steht in Konkurrenz zur Schiene und zur Straße, die stetig abnehmende Emissionen bezogen auf die Transportleistung aufweisen. Die Binnenschifffahrt ist ein umweltfreundlicher Verkehrsträger. Unter den oben angeführten Kontext ist aber wohl die Frage zu stellen: „Kann es sich die Binnenschifffahrt leisten, nicht umweltfreundlicher zu werden?“ Die Antwort lautet wohl: „Nein.“ Im Folgenden werden kurz Maßnahmen erläutert, die zur Verbesserung der Umweltfreundlichkeit der Binnenschifffahrt beitragen. Betrachtet werden dabei die relevante Gesetzgebung und Standards, sowie die Ergebnisse der EU-Projekte MoVe IT! und PROMINENT.

### **Gesetzgebung und Standards**

Mit der Veröffentlichung der Richtlinie 2009/30/EG wurde der Grundstein für eine Verbesserung des Umweltverhaltens der Binnenschifffahrt gelegt. Diese Richtlinie schreibt vor, dass ab 1.1.2011 in der Binnenschifffahrt der EU nur Kraftstoffe verwendet werden dürfen, die einen Schwefelgehalt aufweisen, der  $\leq 10$  mg/kg Kraftstoff ist (10 ppm). Der derzeit verwendete Kraftstoff ist also quasi schwefelfrei, wodurch die Schwefeldioxidemissionen verschwindend gering sind. Auch die Partikelemissionen konnten dadurch merklich reduziert werden. Zudem erlaubt dieser Kraftstoff die Anwendung von sehr effektiven Emissionsreduktionstechnologien z.B. die selektive katalytische Reduktion (SCR).

In der Verordnung (EU) 2016/1628 sind die Grenzwerte für Abgasemissionen neuer Motoren geregelt. Die Grenzwerte, die zu erfüllen sind, sind sehr streng, weshalb Emissionsreduktionstechnologien z.B. Abgasnachbehandlung durch selektive katalytische Reduktion und Partikelfilter wohl zur Anwendung kommen müssen. Erstmals ist auch ein Grenzwert für die Anzahl der Partikel PN einzuhalten (Motoren mit einer Leistung  $P \geq 300$  kW). Die Grenzwerte der Verordnung (EU) 2016/1628 finden ab 1.1.2018 für die Typengenehmigung und ab 1.1.2019 für das Inverkehrbringen von Motoren Anwendung. Für leistungsstarke Motoren ( $P \geq 300$  kW) gelten die Zeitpunkte 1.1.2019 (Typengenehmigung) und 1.1.2020 (Inverkehrbringen von Motoren). In der Tabelle 1 sind die entsprechenden Grenzwerte der Stufe V für Hauptmotoren angegeben. Für Hilfsmotoren gelten dieselben Zeitpunkte und Grenzwerte wie für Hauptmotoren.

Mittlerweile diskutiert die EU-Kommission auch freiwillige Umweltstandards, die auch auf bestehende Schiffe angewandt werden könnten. Derzeit gibt es solche in Belgien und den Niederlanden, deren Einhaltung durch den sogenannten Green Award gekennzeichnet ist. Schiffe die diesen Award haben können bis zu 30 % ermäßigte Hafengebühren bekommen. Ein weiteres Beispiel ist der Hafen Rotterdam, in dem ab 2025 nur Binnenschiffe zugelassen sind, deren Motoren mindestens der ZKR-Stufe II entsprechen.

*Tabelle 1:* Emissionsgrenzwerte der Stufe V für die Motorenklasse IWP (Hauptmotoren). Tabelle entnommen der Verordnung (EU) 2016/1628.

Emissionsstufe	Motorenunterklasse	Leistungsbe- reich	Art der Zündung	CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM Masse	PN	A
		kW		g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	#/kWh	
Stufe V	IWP-v-1 IWP-c-1	19 ≤ P < 75	alle	5,00	(HC + NO <sub>x</sub> ≤ 4,70)		0,30	—	6,00
Stufe V	IWP-v-2 IWP-c-2	75 ≤ P < 130	alle	5,00	(HC + NO <sub>x</sub> ≤ 5,40)		0,14	—	6,00
Stufe V	IWP-v-3 IWP-c-3	130 ≤ P < 300	alle	3,50	1,00	2,10	0,10	—	6,00
Stufe V	IWP-v-4 IWP-c-4	P ≥ 300	alle	3,50	0,19	1,80	0,015	1 × 10 <sup>12</sup>	6,00

### MoVe IT!

Die oben angeführten Grenzwerte gelten für neue Motoreneinbauten, deren Zahl pro Jahr sehr limitiert ist. Daher wird es wohl noch Dekaden dauern, bis der Großteil der europäischen Binnenschiffahrtsflotte diesen strengen Grenzwerten entspricht. Um das Umweltverhalten der Binnenschiffahrt zu verbessern, ist es zielführend auch die bestehende Flotte zu betrachten und Maßnahmen zu setzen, die auf bestehende Schiffe angewandt werden können. Dies war das Ziel des FP7-EU-Projekts MoVe IT!<sup>6</sup>. Die Kernergebnisse für praktische Anwendung durch z.B. Schifffahrtstreibende sind in den Guidelines zusammengefasst, die von der Projektwebseite heruntergeladen werden können. Unter anderem wurden in MoVe IT! fünf konkrete Schiffe betrachtet, deren Betriebsdaten wie Transportleistung und Kraftstoffverbrauch durch die jeweiligen Schifffahrtstreibenden dem Projekt zur Verfügung gestellt wurden. Dieser Umstand erlaubte es, eine umfassende Umweltanalyse der Schiffe mit einem Minimum an Fehlerquellen durchzuführen.

In der Umweltanalyse wurden die CO, CO<sub>2</sub>, HC, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und Partikelemissionen (PM) betrachtet. Die Emissionen der Schiffe wurden mit jenen eines 34–40 t Sattelzugs verglichen, wobei die ursprüngliche Umweltanalyse um den Einfluss der Staubaufwirbelung und des Abriebs der Reifen und Bremsen des Sattelzugs erweitert wurde.

<sup>6</sup> <http://www.moveit-fp7.eu/>

Die ursprüngliche Umweltanalyse findet sich in Schweighofer et al. (2013). Der Einfluss der Staubaufwirbelung und des Abriebs der Reifen und Bremsen wurde mit folgendem Emissionsfaktor aus Düring und Lohmeyer (2011) berücksichtigt:  $PM_{10} = 130 \text{ mg/km}$  ( $PM_{2.5} = 55 \text{ mg/km}$ ). Dieser Faktor wurde zum Emissionsfaktor des Abgases aus dem HBEFA 3.1 (2010) addiert. Die komplette Analyse ist in Schweighofer (2015) dokumentiert.

Die Umweltanalyse ergibt für die  $CO_2$ -,  $CO$ -,  $SO_2$ - und Partikelemissionen der betrachteten Schiffe bezogen auf die Transportleistung in tkm deutlich niedrigere Werte als jene, die für den umweltfreundlichsten Sattelzug (EURO VI) ermittelt wurden. Die Partikelemissionen im Abgas des Sattelzuges sind verschwindend gering, jedoch der Beitrag durch Aufwirbelung von Staub und Abrieb ist so hoch, dass die Gesamtemissionen merklich über jenen der Binnenschiffe liegen (Bild 1). Daher wird darauf hingewiesen, dass für einen ordnungsgemäßen Verkehrsträgervergleich auch der Einfluss von Aufwirbelung und Abrieb zu berücksichtigen ist. Durch die Anwendung eines Partikelfilters können die Partikelemissionen der Schiffe grob auf das Niveau der Abgaspartikelemissionen eines EURO VI Sattelzuges gesenkt werden (siehe Veerhaven X im Bild 1).

Nur die  $NO_x$  und HC-Emissionen fallen für die Binnenschiffe höher aus, wobei durch Anwendung von entsprechenden Katalysatoren (u.a. SCR) die Binnenschiffe auf ein ähnliches Niveau hinsichtlich dieser Emissionen gebracht werden können.

Die oben angeführten Ergebnisse gelten nur für die betrachteten Schiffe. Für andere Schiffe, im Besonderen für kleinere und ältere Schiffe, kann das Ergebnis anders ausfallen.

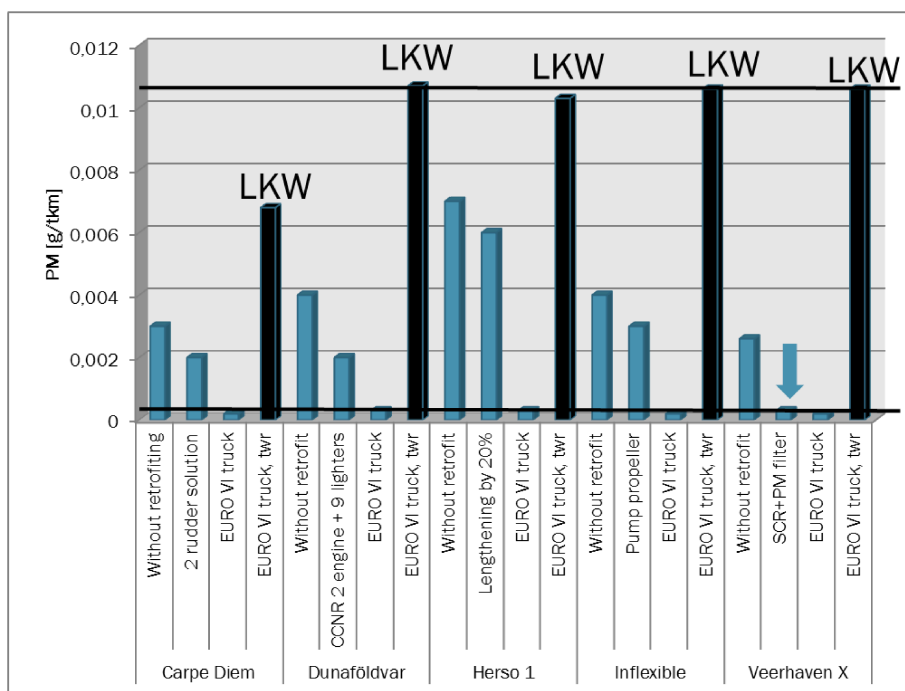


Bild 1: Partikelemissionen in g/tkm von fünf Binnenschiffen des MoVe IT!-Projekts verglichen mit jenen eines Sattelzugs (34 – 40 t) unter Berücksichtigung von Staubaufwirbelung und Abrieb des Straßenverkehrs ( $PM_{10}$ ).

In Tabelle 2 ist eine Beurteilung von potentiellen Umrüstungsmaßnahmen der fünf MoVe IT!-Schiffe hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und Verbesserung des Umweltverhaltens dargestellt.

Wirtschaftlich sehr sinnvolle Maßnahmen mit einer guten Verbesserung des Umweltverhaltens sind der Einbau von neuen Motoren verbunden mit einer Kapazitätserweiterung durch Leichter und Kapazitätserweiterung durch Schiffsverlängerung. Dies gilt für die konkreten MoVe IT!-Schiffe.

Im H2020-EU-Projekt PROMINENT wurde die Kapazitätserweiterung von einer weiteren Untersuchung ausgeschlossen, da der Markt an sich schon über Überkapazitäten verfügt.

Der Einbau von SCR-Katalysatoren und Partikelfiltern hat den größten Umwelteffekt. Diese Maßnahme ist aber für den Schifffahrtstreibenden nicht wirtschaftlich sinnvoll, da neben den hohen Investitionskosten auch erhöhte Betriebskosten durch Wartung sowie Harnstofflösungs- und erhöhte Kraftstoffverbräuche entstehen. Im Gegensatz zum Schifffahrtstreibenden profitiert aber die Bevölkerung von dieser Maßnahme in großem Maße. Die Anwendung von selektiver katalytischer Reduktion und Partikelfiltern auf alle Motoren der heutigen Binnengüterschiffahrtsflotte der EU würde eine Senkung der externen Kosten im Ausmaß von etwa 1.5 Milliarden Euro / Jahr bewirken. Es sei angenommen, dass die EU-Güterschifflotte aus ca. 10 000 motorisierten Einheiten besteht. Dann könnte man mit der oben erwähnten einmaligen Senkung der externen Kosten den Einbau eines SCR-Katalysators und eines Partikelfilters für jedes Schiff mit 150 000 Euro fördern. Unter der Voraussetzung, dass alle Schiffe umgerüstet sind und die Maßnahmen sofort greifen, würde die Gesellschaft nach nur einem Jahr 1.5 Milliarden Euro Gewinn pro Jahr machen, was volkswirtschaftlich Sinn macht, plakativ gesagt. Für weitere Details siehe Schweighofer et al. (2013).

Tabelle 2: Beurteilung von Umrüstungsmaßnahmen der fünf MoVe IT!-Schiffe hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und Verbesserung des Umweltverhaltens.

	Umrüstungsmaßnahme	Wirtschaftlich sehr sinnvoll	Wirtschaftlich noch überlegenswert	Wirtschaftlich nicht sinnvoll	Verbesserung des Umweltverhaltens
<b>Schubschiff (Donau)</b>	Entfernung von den Propellern vorangestellten Rudern + Einbau eines Bugstrahlruders	+			+
	Neue Motoren + Kapazitätserweiterung von 6 Leichtern auf 9 Leichter	+			++++
<b>Johann Welker (L = 84.95 m, Donau)</b>	Kapazitätserweiterung durch Schiffsverlängerung um 20 %	+			++
	Verfüllung des Zwischenraums zwischen schiebendem Schiff und Leichter		+		+
	Einbau eines "Pump Propeller"		+		++
<b>Schubschiff (Seine)</b>	Einbau eines "Pump Propeller"		+		++
	Austausch der Ruder		+		+
	Entfernen von Streben an Propellerdüsen			+	+
<b>Schubschiff (Rhein)</b>	Einbau von SCR-Katalysatoren und Partikelfiltern			+	+++++
<b>Containerschiff (L = 110 m, Umgebung Rotterdam)</b>	2 - Ruderlösung			+	+
	Verkürzung der Gondeln im Hinterschiff			+	+

**PROMINENT**

Auch in dem H2020-EU-Projekt PROMINENT<sup>7</sup> steht die Verbesserung des Umweltverhaltens der Binnenschifffahrt im Mittelpunkt. Hier setzt man auf die Entwicklung von standardisierten technischen Lösungen, die zeitnah und kostengünstig auf einen Großteil der europäischen Flotte angewandt werden können.

PROMINENT setzt auf folgende Schwerpunkte:

- Steigerung der Energieeffizienz und Reduktion von Abgasemissionen;
- Zertifizierung und Monitoring von Energieverbrauch und Abgasemissionen;
- Harmonisierung und Modernisierung fachspezifischer Qualifikationen und Standards;
- verstärkte Einbindung der Binnenschifffahrt in Transportketten.

Die ersten Projektaktivitäten umfassten die Ausarbeitung und Bewertung einer sehr großen Anzahl von verschiedenen Technologien, die zur Verbesserung des Umweltverhaltens der Binnenschifffahrt beitragen können. Unter Berücksichtigung der oben genannten Kriterien hinsichtlich der Verbesserung des Umweltverhaltens, Kosten und Anwendbarkeit konnten die gewonnenen Ergebnisse in eine sogenannte Shortlist von Maßnahmen mit gutem Potential zur Verbesserung des Umweltverhaltens der Binnenschifffahrt überführt werden (Tabelle 3).

Die entsprechende Untersuchung ist in Maierbrugger et al. (2015) dokumentiert. Die in Tabelle 3 angeführten Maßnahmen werden derzeit in PROMINENT weiter untersucht und ausgearbeitet.

Tabelle 3: Shortlist von Maßnahmen zur Verbesserung des Umweltverhaltens der Binnenschifffahrt, ausgearbeitet im H2020-EU-Projekt PROMINENT (Maierbrugger et al 2015). Bezug der Emissionsreduktion auf Motor der Stufe ZKR II.

Art der Maßnahme	Bereich	Maßnahme	NOx	PM	CO2 allein	THG (CO2 & CH4)	Anwendbarkeit auf Flotte	Wirtschaftliche Machbarkeit (Schiffahrtstreibender)	Technische Reife	Nichttechnische Reife (Barrieren)	
			%	%	%	%	% des Kraftstoffverbrauchs in Europa	+++ / ---	TRL	+++ / ---	
Schiffsbezogene technische Maßnahmen	Kraftstoffe, Standardlösungen	Anwendung von blossem LNG (verflüssigtes Erdgas) - Funkenzündung	70-80	up to 95	20-25	0-10	10 - 50%	++	6	---	
		Anwendung von dualen Kraftstoffen (LNG und Diesel)	50-65	50-90	20-25	0-10	10 - 50%	++	6	--	
		Anwendung von Gas-to-Liquid (GTL)	10	20	0	0	>50%	-	9	0	
	Antriebssystem, Standardlösungen	Selektive katalytische Reduktion (SCR)	70-90	0-20	≈ 0	≈ 0	10 - 50%	--	8	-	
		Dieselpartikelfilter	0	90	≈ 0	≈ 0	10 - 50%	---	7	-	
		Kombination SCR und Partikelfilter	80-90	90	≈ 0	≈ 0	10 - 50%	---	7	-	
		Ersatz des Dieselmotors der ZKR Stufe I durch einen Motor der ZKR Stufe II	15-35	40-60	0	0	>50%	0/-	9	0	
		Ersatz des Dieselmotors durch einen Motor der EU Stufe V	65	80-90	0	0	>50%	-	5	--	
		Der Anwendung entsprechende Leistung	0-10	0-10	0-10	0-10	100%	++	9	0	
Infrastruktur	Wasserstraßeninformationen	Echtzeitinformationen zur Fahrinne	14 (3-25)				>50%	+	5/7	-	
		Schiffsbetriebliche Maßnahmen					Fahrverhalten	Anpassung der Schiffsgeschwindigkeit	>50%	+	5
	Optimierte Wahl der Schiffsroute	>50%					+	5	-		

<sup>7</sup> <http://www.prominent-iwt.eu/>

Die Anwendung von verflüssigtem Erdgas (LNG) hat einen sehr großen positiven Effekt auf die Abgasemissionen der Binnenschiffahrt. Ebenso wie bei der Verwendung von elektrischem Strom für den Antrieb ist aber auch hier die Frage zu stellen, woher kommt die Energie, wie wurde sie hergestellt. Erdgas, und im Übrigen auch Erdöl, kann durch sogenanntes Fracking gewonnen werden. Diese Maßnahme kann erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt haben und in der Gesamtbilanz den positiven Effekt auf die Abgasemissionen der Binnenschiffahrt schmälern oder zunichte machen. Die wirtschaftliche Machbarkeit von der Verwendung von LNG wurde sehr positiv bewertet, da zum Zeitpunkt der relevanten Untersuchungen, der prognostizierte Unterschied zwischen LNG-Preis und Gasölpreis relativ groß war und eine Amortisation der Investition in einer angemessenen Zeit erwartet werden konnte. Die tatsächliche wirtschaftliche Machbarkeit dieser Maßnahme hängt u.a. von dem tatsächlich auftretenden Preisunterschied zwischen LNG und Gasöl ab. In Kelderman et al. (2017) ist eine sehr ausführliche Kosten/Nutzen-Analyse hinsichtlich der Anwendung von LNG für eine große Anzahl von verschiedenen Binnenschiffen und drei Preisentwicklungsszenarien beschrieben. Zusammengefasst kommt man zum Schluss, dass LNG für große Schiffseinheiten mit einem signifikanten Kraftstoffverbrauch pro Jahr, z.B. Schubschiffe als Neubauten, wirtschaftlich Sinn machen kann, was bedeutet, dass die Investitionskosten über reduzierte Kraftstoffkosten unter den getroffenen Annahmen zurückverdient werden können. Die Anwendung von selektiver katalytischer Reduktion und Partikelfilter auf bestehende Maschinenanlagen hat einen sehr großen positiven Umwelteffekt. Jedoch die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahme wurde als negativ beurteilt, da dem Schiffahrtstreibenden nur Kosten entstehen und er per Gesetz seine bestehende Anlage nicht aufrüsten muss. Siehe auch die Ausführungen im Kapitel MoVe IT!. In PROMINENT wurde ein modulares SCR-Partikelfiltersystem entwickelt, welches bei einer voraussichtlich merklichen Reduktion der Herstellungskosten (30 %) an die meisten gängigen Motoren angepasst werden kann, und welches in der Lage ist, die Emissionsgrenzwerte der EU-Stufe V einzuhalten. Nur hinsichtlich der Anzahl der Partikel PN kann man noch keine Aussagen machen.

Auch der Austausch eines ZKR-Stufe-I-Motors durch einen der ZKR-Stufe II hat einen sehr positiven Effekt auf das Umweltverhalten. Diese Maßnahme wurde auch als wirtschaftlich neutral bewertet, da die meisten Motoren sowieso ausgetauscht werden müssen, und der Einbau eines Motors der EU-Stufe V teurer käme. Diese Maßnahme ist aber nur noch sehr kurze Zeit bis 2019/20 möglich.

Der Einbau eines EU-Stufe-V-Motors hat einen größeren positiven Umwelteffekt als die vorherige Maßnahme und ist ab 2019/20 für Neueinbauten laut Verordnung (EU) 2016/1628 vorgeschrieben.

Die Zurverfügungstellung von umfassenden Echtzeitinformationen zur Fahrrinne, wie Wassertiefe und Strömungsgeschwindigkeit, können zur Optimierung der Abladung eines Schiffes und seiner Route in der Fahrrinne beitragen. Zudem können entsprechende Werkzeuge zum energieeffizienten Fahren entwickelt werden, die dem Schiffsführer z.B. eine Empfehlung für eine wirtschaftliche Geschwindigkeit oder Motorendrehzahl geben. Weiters kann die Ermittlung von Echtzeitinformationen zur Fahrrinne der betroffenen Wasserstraßenverwaltung sehr wertvolle Hinweise hinsichtlich notwendiger Wartungsarbeiten geben, wovon dann alle Schiffahrtstreibenden profitieren. Die Ausarbeitung eines Werkzeugs zum energieeffizienten Fahren und die Nutzung von Messungen von Wassertiefe und Strömungsgeschwindigkeit an Bord von kommerziellen Schiffen sind wichtige Bestandteile des H2020-EU-Projekts PROMINENT.



## **Zusammenfassung**

Im Umfeld stetig steigender Anforderungen an das Umweltverhalten der Verkehrsträger befindet sich die Binnenschifffahrt im Umbruch. Auf Grund der bestehenden Gesetzgebung fährt die Binnenschifffahrt heute quasi schwefelfrei und morgen quasi frei von Abgasemissionen mit verringerten Treibhausgasemissionen. Neue Schiffe werden einen Quantensprung nach vorne in Bezug auf ihr Umweltverhalten machen. Eine große Herausforderung in der nahen Zukunft wird sein, wie man die Umweltfreundlichkeit der bestehenden Flotte steigern kann. Mögliche Maßnahmen dazu sind die Schaffung von attraktiven finanziellen Anreizen, Entwicklung von kostengünstigen technischen Maßnahmen sowie unbürokratische Zertifizierung und behördliche Anerkennung der Umrüstungsmaßnahmen.

Die erzielten Fortschritte hinsichtlich Gesetzgebung, Standards und technischer Entwicklungen basieren auf den Erkenntnissen zahlreicher Forschungsprojekte und Untersuchungen. Die Binnenschifffahrt ist noch mit vielen Herausforderungen wie z.B. Umrüstung der bestehenden Flotte, Steigerung der Energieeffizienz sowie Anwendung von alternativen Kraftstoffen und Antriebssystemen konfrontiert.

Für eine erfolgreiche Bewältigung dieser Herausforderungen sind entsprechende geförderte Forschungsprojekte notwendig, deren Ergebnisse in neue Vorschriften und Standards, administrative und finanzielle Rahmenbedingungen sowie technische und infrastrukturelle Lösungen übergeführt werden können.

## **Literatur**

Düring, I., und Lohmeyer, A. (2011): Einbindung des HBEFA 3.1 in das FIS Umwelt und Verkehr sowie Neufassung der Emissionsfaktoren für Aufwirbelung und Abrieb des Straßenverkehrs. Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Radebeul unter Mitarbeit der TU Dresden sowie der BEAK Consultants GmbH. Projekt 70675-09-10, Juni 2011. Gutachten im Auftrag von: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.

HBEFA 3.1 (2010): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 3.1, [www.hbefa.net](http://www.hbefa.net), INFRAS, Schweiz.

Kelderman, B. et al. (2017): D2.6 Ex-ante cost/benefit analysis of business cases for standard LNG Configurations. Technischer Bericht. H2020-EU-Projekt PROMINENT.

Maierbrugger, G. et al. (2015): D 1.2 List of best available greening technologies and concepts. Technischer Bericht. H2020-EU-Projekt PROMINENT.

Schweighofer, J. (2015): Comparison of emissions of inland waterway transport with the ones of road transport, considering tear, wear and re-suspension of dust. Technischer Bericht. viadonau. Vertraulich.

Schweighofer, J. et al. (2013): D7.3 Environmental impact. Technischer Bericht des EU-Projekts MoVe IT!.





## **Integrative Ansätze zur Bewältigung der wasserbaulichen Herausforderungen an der österreichischen Donau**

Mag. Robert Tögel, via donau – Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH

### **Einleitung**

Österreichs Wasserstraßengesellschaft viadonau ist nicht nur Infrastruktur-Betreiber sondern trägt auf der Grundlage des Wasserstraßengesetzes 2005 auch Verantwortung für den Lebensraum Donau. Im vorliegenden Beitrag werden die wesentlichen wasserbaulichen Herausforderungen an der österreichischen Donau aus der Perspektive der viadonau zusammengefasst. Die beiden verbliebenen freien Fließstrecken in der Wachau und insbesondere der Donau östlich von Wien stehen dabei im Mittelpunkt der Betrachtung.

### **Wasserbauliche Herausforderungen im Überblick**

Die zentrale Herausforderung an der österreichischen Donau aus Sicht der viadonau ist das Sediment- bzw. Geschiebemanagement. Mit dem Kraftwerk Freudenu wurde im Jahr 1998 das zehnte und vorerst letzte der großen Laufkraftwerke Österreichs in Betrieb genommen. Das UNESCO Weltkulturerbe Wachau sowie die durch einen Nationalpark geschützten Donau-Auen östlich von Wien bleiben so zumindest auf absehbare Zeit von einer Stauhaltung verschont.

Herausforderungen ergeben sich heute durch die Unterbrechung des Sediment- bzw. Geschiebetransports. Während sich in den Stauräumen hohe Mengen an Sedimenten ablagern (Sedimentüberschuss), kommt es unterhalb der Kraftwerke in den freien Fließstrecken zu einem Sedimentdefizit, welches zu Sohlerosion bzw. Eintiefung der Donausohle führt. Verstärkt wird dieses Defizit „von oben“ durch den geringen Sedimenteintrag der Zubringer „von der Seite“, denn auch hier befinden sich zahlreiche Laufkraftwerke, sowie die fast durchgehende Uferbefestigung mit Blocksteinwurf, welche die Seitenerosion und Laufverlagerung verhindert.

Im Bereich des Hochwasserschutzes besteht die Aufgabe der nächsten Jahre im Lückenschluss der bestehenden Anlagen für einige kleinere Gemeinden auf der Grundlage bereits eingeführter Technologien sowie in der Sanierung bestehender Bauwerke. Auch im Hochwasserschutz spielt das Sedimentmanagement eine wichtige Rolle: Neben Baggerungen im Bereich der Stauräume zur Absenkung von Hochwasserspiegellagen sind die Remobilisierung von Feinsedimenten aus Stauräumen sowie die Ablagerung dieses Materials nach Flutereignissen im Vorland wichtige Fragestellungen in denen sowohl Management- als auch Forschungsbedarf besteht (vgl. SED\_AT 2017).

Für das Sedimentmanagement in den gestauten Abschnitten ist vor allem der Betreiber der Donaukraftwerke, die VERBUND Hydro Power GmbH verantwortlich. Für die beiden freien Fließstrecken ist viadonau zuständig, wobei auch hier eine Zusammenarbeit mit dem VERBUND erforderlich ist. In beiden Abschnitten kommt zusätzlich der Aufrechterhaltung der Mindestfahrwassertiefen für die Güterschifffahrt hohe Bedeutung zu. Gleichzeitig handelt es sich um Schutzgebiete von hoher ökologischer Bedeutung.

## Wachau

Aus Sicht der Wasserstraßen-Infrastruktur befinden sich in der Wachau zwar zahlreiche Seichtstellen, diese sind allerdings überwiegend nicht kritisch bzw. nicht limitierend für den Gütertransport und konnten in den letzten Jahren immer besser durch ein optimiertes Baggermanagement angesprochen werden.

Trotz ihres frei fließenden Charakters verfehlt der Donauabschnitt jedoch den guten Zustand laut EU Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), denn das KO- Kriterium der Fisch-Biomasse von mindestens 50 kg/ha wird unterschritten. Durch eine Reihe von LIFE Projekten hat viadonau zahlreiche Nebenarme wieder verstärkt mit der Donau verbunden und - auch mit dem Aushub der Erhaltungsbaggerungen - Kiesstrukturen geschaffen. Mit dem LIFE Projekt „Auenwildnis Wachau“ befindet sich derzeit ein weiteres Renaturierungsprojekt in Umsetzung. Der Fischbestand erholt sich langsam und der Populationsaufbau der wesentlichen Leitarten entwickelt sich in Richtung des natürlichen Zustands. Ob die Anstrengungen ausreichen, um - wie nach der WRRL gefordert - bis 2021 die Biomasse über den Schwellenwert anwachsen zu lassen, bleibt abzuwarten.



*Bild 1: Die Wachau ist UNESCO Weltkulturerbe, Natura 2000 FFH- und Vogelschutzgebiet sowie Landschaftsschutzgebiet. Zur Verbesserung des ökologischen Zustandes werden Gewässervernetzungen - im Bild Schallemmersdorf, Teil des Best LIFE Nature Projekts 2015 „Mostviertel-Wachau“ - und Kiesstrukturen geschaffen. (Foto: Haslinger)*

## Donau östlich von Wien

Für viadonau stellt der frei fließende Donauabschnitt zwischen dem Donaukraftwerk Freudenu und der Staatsgrenze zur Slowakei eine besondere Herausforderung dar. Hier bestehen drei große Defizite von denen sich die Erhaltungsziele für den Streckenabschnitt ableiten.

- Das Geschiebedefizit und die bestehende Regulierung verursachen in der freien Fließstrecke eine **Sohleintiefung**. Mit der Stromsohle sinken die Oberflächen- und Grundwasserspiegel ab und die Kiesmächtigkeit am Sohlgrund geht zurück. Daher sollen die mittlere Höhenlage der Sohle und die Wasserspiegellagen stabilisiert werden.

- Durch die Errichtung des Nationalparks Donau-Auen im Jahr 1996 haben sich die Nutzungsansprüche entlang der Ufer verändert. Die **bestehende Verbauung** der Ufer sowie die abgetrennten Nebenarme unterbinden eine dynamische Entwicklung der Auenlandschaft (Erosions- und Sedimentationsprozesse). Durch umfangreiche Renaturierungen sollen neue auentypische Lebensräume entstehen. Aufweitungen bzw. Abflussaufteilungen entlasten darüber hinaus die Stromsohle und tragen zum Hochwasserschutz bei.
- Innerhalb Österreichs stellt die Donau östlich von Wien die größte **Schwachstelle für einen wirtschaftlichen und sicheren Gütertransport** dar. Insbesondere in Niederwasserperioden bestehen unzureichende Fahrwassertiefen, sodass die Wettbewerbsfähigkeit des Binnenschiffs gegenüber Straße und Schiene eingeschränkt ist. Die limitierenden Seichtstellen sollen daher beseitigt werden.

Schon zum Beginn der Problemanalyse wurde die Donau östlich von Wien integrativ betrachtet und das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit) definierte die drei oben genannten Themenbereiche als gleichrangig. Die Konzeption der wasserbaulichen Maßnahmen des „Flussbaulichen Gesamtprojekts Donau östlich Wien“ (FGP) erfolgte ab dem Jahr 2002 durch ein interdisziplinäres Expertengremium, zusammengesetzt aus Experten aus den Bereichen Schifffahrt, Regionalplanung, Ökologie und Wasserbau. Die Planungsgrundsätze wurden vom Leitungsausschuss einstimmig verabschiedet und dienten dem ebenfalls interdisziplinär zusammengesetzten Planungsteam als Richtschnur. Der integrative Planungsprozess wird im Handbuch PLATINA (2010) dargestellt.

Das FGP startete zunächst mit einer **Konzeptions- und Pilotprojektphase**. Durch die Umsetzung von hydrodynamischen Modellierungen, physischen Modellversuchen und Pilotprojekten in freier Natur sollten Erkenntnisse gewonnen und Risiken minimiert werden. Parallel wurde das „Generelle Projekt 2006“ (GP2006) ausgearbeitet und im Jahr 2006 zur Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) eingereicht. Es war vorgesehen, neue Erkenntnisse schrittweise in dieses zweistufige Genehmigungsverfahren einfließen zu lassen.

Mit Baustart des **Pilotprojekts Bad Deutsch-Altenburg** im Jahr 2012 wurde ein Stakeholder-Beteiligungsmodell eingerichtet, welches Vertretern der Wirtschaft und Umwelt-NGOs die Möglichkeit einräumte, die Abwicklung des Vorhabens zu begleiten und die Ergebnisse des Versuchs gemeinsam zu diskutieren. Mit der Einbindung der Stakeholder gelang es die Diskussion, die zuvor vor allem über die Medien geführt wurde und zu negativer Berichterstattung führte, zu versachlichen. Das Pilotprojekt bewährte sich nicht nur als wasserbaulicher Versuch sondern auch als „Demonstrationsobjekt“. Durch die wissenschaftliche Begleitung der Baumaßnahmen liegen heute in der Natur gesammelte Erfahrungen über das Zusammenwirken von Renaturierungsmaßnahmen mit einer optimierten Niederwasserregulierung sowie zu Möglichkeiten vor, der Eintiefung der Donausohle entgegenzuwirken.

Die Ergebnisse von mittlerweile sechs Pilotvorhaben wurden mit neuen Entwicklungen im Wasserstraßen- und Verkehrsmanagement zusammengeführt. Herausgekommen ist dabei nicht nur eine Weiterentwicklung der wasserbaulichen Maßnahmen, sondern auch ein neues Konzept, wie den Herausforderungen in diesem Abschnitt beizukommen ist - der **Maßnahmenkatalog für die Donau östlich von Wien**. Die Erhaltungsziele werden durch eine Reihe wasserbaulicher Optimierungsprojekte und laufende Erhaltungsmaßnahmen erreicht. Diese treten an die Stelle eines vorab definierten Großprojekts (wie im GP2006 vorgesehen). Durch eine Prioritätenreihung für jeden Maßnahmentyp wird eine hohe Wirkungsorientierung erzielt. Folgende Maßnahmentypen sind vorgesehen:

- **Integratives Geschiebemanagement:** War im GP2006 noch die Stabilisierung der mittleren Höhenlage der Stromsohle hauptsächlich durch die flächige Aufbringung von Grobkies vorgesehen, erfolgt diese nun durch Geschiebemanagement: Kies, der im Zuge von Erhaltungsmaßnahmen oder in Geschiebefängen gebaggert wird, wird möglichst weit stromauf verführt und dort verklappt (Geschiebeumlagerung). Eine punktuelle externe Geschiebezugabe ist zur Kompensation des Abriebs vorgesehen.
- **Optimierung der Regulierungsbauwerke:** In kritischen Furtbereichen wird die Niederwasserregulierung verstärkt. In Eintiefungsbereichen erfolgt die maßvolle Zurücknahme der Regulierung, um durch Aufweitungen zur Entlastung der Stromsohle beizutragen.
- **Sicherung kritischer Kolkbereiche:** Durch die Sicherung lokaler Gefahrenstellen oder die Entlastung der Stromsohle mit Hilfe von Profilaufweitungen wird der vollständige Austrag von Kies an der Stromsohle verhindert.
- **Gewässervernetzungen:** Große Nebenarmsysteme werden wieder stärker an den Hauptstrom angebunden. Ziel ist eine möglichst dauerhafte Durchströmung.
- **Uferrückbauten:** Zur Ausbildung natürlicher Uferstrukturen ist der lokale Rückbau der harten Uferverbauung am Hauptstrom vorgesehen.
- **Sonstige Maßnahmen:** Die Schnittstelle zwischen Wasserstraßen- und Verkehrsmanagement wird weiterentwickelt, um Informationstechnologien bestmöglich zu nutzen. Sicherheitstechnische Einrichtungen wie Notfallländer werden verbessert.

### Ein lernendes System

Großprojekte weisen wachsende Durchlaufzeiten für Planung, Bewilligung, Ausschreibung und Bauumsetzung auf. Die Erfassung ihrer Wirkungen ist in der Regel erst nach Abschluss aller Bauarbeiten vorgesehen. Weiterentwicklung ist während dieser Jahre nur eingeschränkt möglich.

Im Maßnahmenkatalog wird die erforderliche Flexibilität gewahrt, um neue Erkenntnisse und aktuelle Entwicklungen in die Umsetzung einfließen zu lassen. Laufende Erhaltungsmaßnahmen können kontinuierlich verbessert werden. Auch die schrittweise Umsetzung der Optimierungsprojekte ermöglicht eine ständige Weiterentwicklung. Grundvoraussetzung für dieses „Lernen vom Fluss“ ist die wissenschaftliche Begleitung der Maßnahmen, wie etwa durch das Christian Doppler Labor „Sedimentmanagement und -forschung“, welches in Kooperation mit der Energiewirtschaft an der Universität für Bodenkultur eingerichtet wurde.

## Stakeholder-Beteiligung

Die Einbindung verschiedenster Interessensgruppen ist eine wichtige Voraussetzung, um sozial- und umweltverträgliche Lösungen zu entwickeln und umzusetzen. Daher wird auch die Abwicklung des Maßnahmenkatalogs von einem Beteiligungsmodell begleitet. Im Zentrum des Modells steht ein Beirat, der sich aus Vertretern der Wirtschaft, Umwelt-NGOs, der Donauschutzkommission (IKSD), des Nationalparks Donau-Auen und viadonau zusammensetzt. Unterstützt wird dieses Gremium durch einen Expertenpool. Zusätzliche Akteurinnen und Akteure werden im Zuge laufender Informations- und Diskussionsangebote eingebunden. Eine wichtige Aufgabe der Stakeholder-Beteiligung ist die Entwicklung eines gemeinsamen Management-Leitbildes für die Nationalparkstrecke.

## Umgesetzte Maßnahmen zeigen Wirkung

Analysen der Entwicklung der Stromsohle an der Donau östlich von Wien zwischen 1996 und 2016 zeigen, dass die Eintiefung der Stromsohle in der zweiten Dekade des Untersuchungszeitraums deutlich zurückgegangen ist. Das durchschnittliche jährliche Kiesdefizit ging um mehr als 40 Prozent zurück (viadonau, 2017). Als Gründe hierfür werden die umgesetzten Pilotprojekte Witzelsdorf und Bad Deutsch-Altenburg sowie eine geänderte Erhaltungsstrategie angesehen. Seit 2009 wird Kies, der im Zuge von Erhaltungsarbeiten gebaggert wird, konsequent stromauf verfrachtet und dort verklappt. Ab 2015 wurden die durchschnittlichen Verfuhrweiten im Rahmen des Geschiebemanagements deutlich gesteigert, wodurch der Kies wesentlich länger im Donauabschnitt verbleibt.

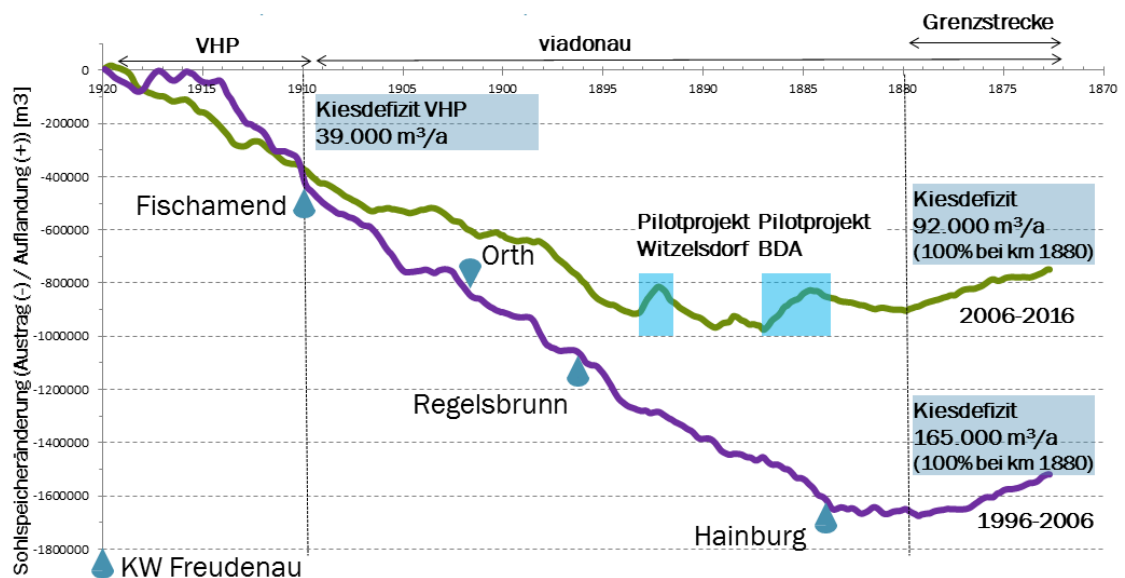


Bild 2: Gegenüberstellung der Sohl Speicheränderung an der Donau östlich von Wien in den Jahren 1996-2006 und 2006-2016. Profilabstand 100 m (viadonau, 2017).

Durch die laufende Auswertung einer optimierten Wasserstraßenerhaltung konnten jene Furtbereiche identifiziert werden, welche hauptverantwortlich für die Nicht-Erreichung der erforderlichen Fahrwassertiefen sind und den höchsten Erhaltungsaufwand verursachen. In den Jahren 2015 und 2017 konnten zwei der fünf kritischen Abschnitte optimiert werden.



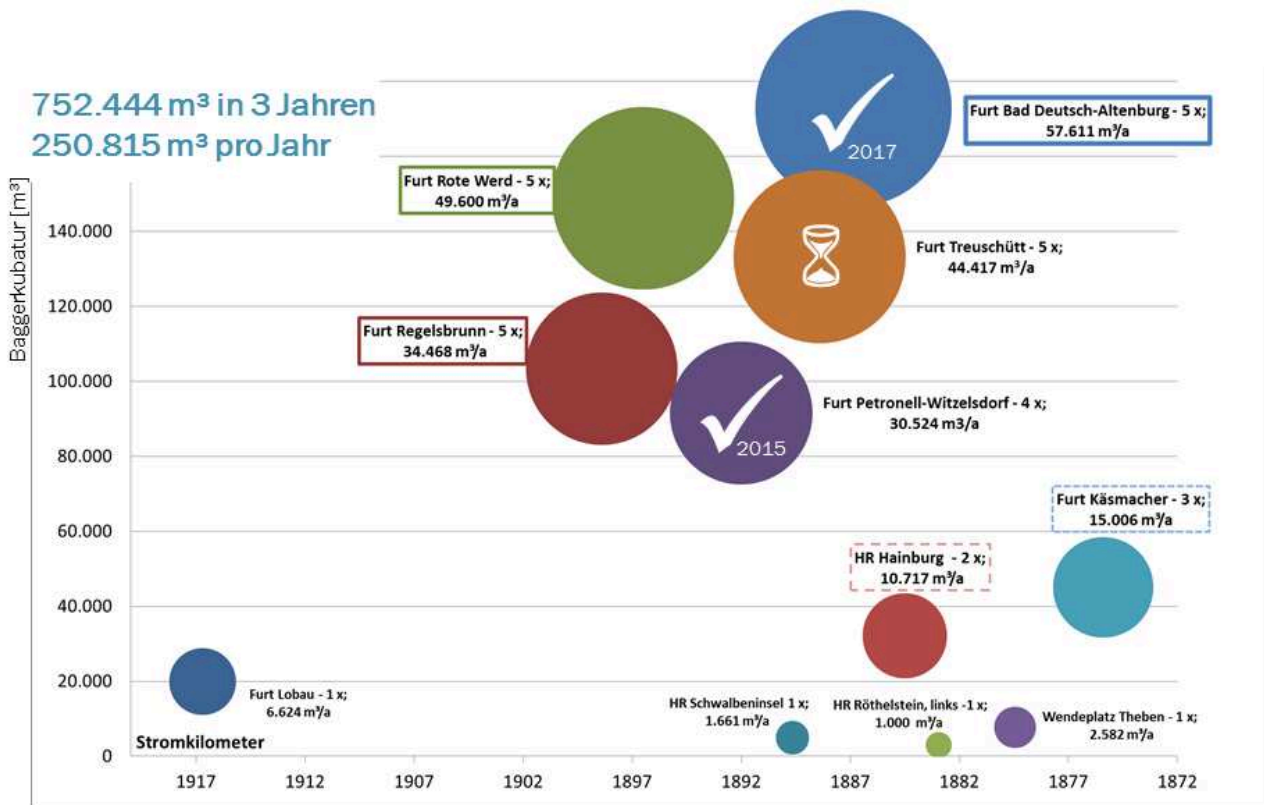


Bild 3: Übersicht über die Erhaltungsbaggerungen bzw. die kritischen Seichtstellen an der Donau östlich von Wien in den Jahren 2014 bis 2017 (viadonau).

### Literatur

- Bundesgesetz über Aufgaben und Organisation der Bundes-Wasserstraßenverwaltung – Wasserstraßengesetz (WaStG), Fassung vom 04.10.2017.
- PLATINA (2010): Manual on Good Practices in Sustainable Waterway Planning; PLATINA Projekt, Juli 2010; S. 81-84.
- SED\_AT (2014): Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: SED\_AT - Feststoffhaushalt, Sedimenttransport und Flussmorphologie im Rahmen des Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplans, Endbericht; September 2014.
- viadonau (2017): Flussbauliches Gesamtprojekt – Maßnahmenkatalog Donau östlich von Wien, lebendige-wasserstrasse.at.



## **Fischabstieg an Wehranlagen – gefahrlos oder kritisch?**

Dr. sc. tech. Roman Weichert, Bundesanstalt für Wasserbau

Dr.-Ing. Carsten Thorenz, Bundesanstalt für Wasserbau

### **Einleitung**

Seit Inkrafttreten des novellierten Wasserhaushaltsgesetzes am 1. März 2010 obliegt dem Bund die Aufgabe, an den von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) errichteten und betriebenen Stauanlagen die ökologische Durchgängigkeit zu erhalten bzw. wiederherzustellen. Eine erste Analyse hat gezeigt, dass die überwiegende Zahl der WSV-Staustufen nicht ausreichend durchgängig ist. Während in der WSV seit einiger Zeit die Planung von Fischaufstiegsanlagen intensiv vorangetrieben wird (Aster und Ernst 2016), gewinnt das Thema Fischabstieg in letzter Zeit an Bedeutung. Wesentlich in diesem Zusammenhang ist, dass für Fischauf- und -abstieg in der Regel unterschiedliche Anlagen realisiert werden müssen, da sich nach dem derzeitigen Kenntnisstand das Fischverhalten im Auf- und im Abstiegsfall voneinander unterscheidet. Nach Sichtweise und Vorgabe des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) ist an Bundeswasserstraßen für Maßnahmen zum Fischschutz bzw. Fischabstieg grundsätzlich das Verursacherprinzip anzuwenden. Das bedeutet, dass ein Betreiber einer Wasserkraftanlage für den Schutz und den schadlosen Abstieg der Fische am Kraftwerk verantwortlich ist, während die WSV für die Gewährleistung des Fischabstiegs über das Wehr zuständig ist. Konkret geben derzeit Planungen für Wehrrersatzneubauten Veranlassung, in diesem Zusammenhang die Gewährleistung eines ausreichenden Fischschutzes einschließlich geeigneter Möglichkeiten zum Fischabstieg auf Basis der gesetzlichen Grundlagen zu prüfen.

Der vorliegende Beitrag soll einen Überblick über vorhandene Kenntnisse beim Fischabstieg an Wehranlagen liefern und gleichzeitig das Erfordernis wie auch das Potenzial für hydraulische und fischökologische Untersuchungen zur Schließung von Wissenslücken aufzeigen. Das Thema Fischabstieg an Wehranlagen ist dabei weder vollständig zu ignorieren, noch stellt es ein unlösbares Problem dar. Es erfordert vielmehr eine differenzierte, standortspezifische Betrachtung und eine frühe Integration in die Planung von Ertüchtigungs- oder Ersatzmaßnahmen an Wehranlagen.

### **Literaturübersicht und offene Fragen**

Unter welchen Bedingungen man beim Thema Fischschutz und Fischabstieg von einem existierenden Stand der Technik sprechen kann, ist umstritten, wobei sich diese Diskussionen derzeit im Wesentlichen auf den Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen beschränken (UBA 2015). Um vorhandene Wissenslücken des Fischabstiegs an Wasserkraftanlagen zu schließen, wurde daher in den letzten Jahren eine Anzahl an Untersuchungen initiiert, die zum Ziel haben, einen Stand der Technik auch für mittlere bis große Wasserkraftanlagen zu etablieren (z.B. Boes et al. 2016, Lehmann et al. 2016). Während demnach ein Wissensfortschritt hinsichtlich des Fischverhaltens an Wasserkraftanlagen zu erwarten ist, wird die Frage des Fischabstiegs an Wehranlagen vergleichsweise wenig betrachtet. Grundsätzlich lassen sich hier zwei Themenbereiche unterscheiden.

Zum einen ist eine offene Frage, wie sich Fische im Oberwasser einer Stauanlage bei der Aufteilung von Abflüssen auf verschiedene Komponenten einer Stauanlage (Wasserkraftanlage, Schleuse, Wehr) verhalten und, wenn sie an der Wehranlage ankommen, wo und wie Bypässe angeordnet werden müssen. In diesem Kontext ist wesentlich, dass sich das Verhalten nicht nur nach Fischart und Fischgröße unterscheiden kann, sondern weitere, über die Zeit veränderliche Aspekte wie Morphologie (Ufer, Sohle) und Hydraulik (Wasserstände, Betrieb der Stauanlage) eine Rolle spielen. Der zweite Themenbereich betrifft den tatsächlichen Vorgang des Fischabstiegs am Wehr. Dieser unterscheidet sich vom beschriebenen Prozess im Oberwasser (und auch vom Fischaufstieg) im Wesentlichen dadurch, dass zunächst davon ausgegangen werden kann, dass kein aktives Verhalten des Fisches eine wesentliche Rolle spielt, sondern der Fisch mit dem überfallenden Wasser bzw. in einem Bypassystem ins Unterwasser „gespült“ wird. Bei diesem Vorgang stehen daher weniger Fragen zum Fischverhalten als Fragen zu möglichen Fischschädigungen und Maßnahmen zur Reduktion derselbigen im Fokus, wobei vor allem der individuelle Aufbau der Stauanlage darüber entscheidet, welche Schadensbilder auftreten können. Auch für diesen Prozess ist die Wirkung der einzelnen potentiell zu Schäden führenden Prozesse fischarten- und fischgrößenspezifisch. Weiterhin spielen Wasserstände, Wehrtyp und Ausgestaltung des Wehrkörpers bzw. des Tosbeckens eine wesentliche Rolle.

Bei der Beurteilung von potenziellen Fischschäden beim Abstieg über eine Wehranlage wird in der Regel auf Kriterien verwiesen, die im DWA-Themenband (2005), dem Handbuch Querbauwerke (MUNLV, 2005) oder der Handreichung Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen (LUBW, 2016) aufgeführt sind. Es sei darauf hingewiesen, dass zwar zwischen den genannten Publikationen einige Jahre liegen, jedoch den fachlichen Aussagen zu den wesentlichen Fragen des Fischabstiegs an Wehranlagen keine zusätzlichen Untersuchungen zu Grunde liegen.

Unter welchen Bedingungen Fische ein über- oder unterströmtes Verschlussorgan passieren, ist nicht Gegenstand der nachfolgenden Betrachtung, da es für sich ein umfassendes und komplexes Thema ist. Vielmehr werden nachfolgend mögliche Schädigungsprozesse während des „passiven“ Abstiegsvorgangs über dem Wehrkörper aufgeführt.

- Findet der Abstieg über das Wehr im freien Fall statt, so kann der Aufprall im Unterwasser zu Verletzungen führen. Die wesentlichen bestimmenden Größen sind hierbei die Fallhöhe, das Wasserpulster im Unterwasser der Stauanlage sowie die Fischgröße. Im DWA-Themenband (2005) wird ausgesagt, dass bei Aufprallgeschwindigkeit von weniger als 13 m/s das Verletzungsrisiko gering sei; solange die Abbremsung des Überfallstrahls ohne starke Ablenkung erfolgt und ausreichende Unterwassertiefen gewährleistet sind. Des Weiteren wird von einer für Fische kritischen Geschwindigkeit von 15 bis 16 m/s gesprochen, die nach einem Fall aus ca. 13 m Höhe erreicht werde. Für den Aufprall auf eine Wasseroberfläche wird in USCAE (1991) eine Geschwindigkeit von gut 18 m/s als nicht letal angegeben. Weiterhin wird hier ein linearer Zusammenhang zwischen Aufprallgeschwindigkeit und Letalität angegeben, wobei eine 100 % Letalität bei einer Geschwindigkeit von 45 m/s erreicht wird. Hinsichtlich der Unterwassertiefen sollte gemäß Odeh & Orvis (1998) die Wassertiefe unterhalb der Stauanlage mindestens ein Viertel der Fallhöhe, keinesfalls aber weniger als 0,9 m betragen.

Dieses vermutlich für Bypasssysteme entworfene Kriterium wurde in DWA (2005) ohne Angaben von Gründen auf Wehranlagen angewandt. In USACE (1998) werden zwei Untersuchungen zitiert, bei denen keine Fischschäden bei Fallhöhen kleiner 10,6 m auftraten. In MUNLV (2005) wird von einer Verletzungsgefahr ab 10 m Absturzhöhe gesprochen.

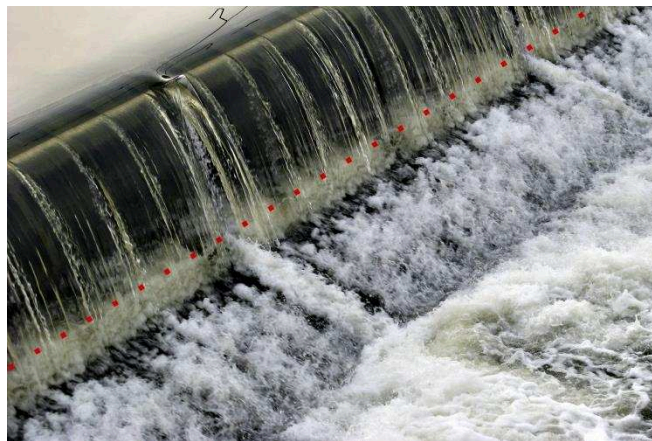
- Als schädigend wird in der Literatur auch eine mögliche Kollision der Fische mit harten Strukturen wie z.B. dem Wehrboden oder Störkörpern im Tosbecken genannt (MUNLV 2005, DWA 2005, USACE 1998). Hierzu liegen nur wenige Untersuchungen vor. In USACE (1991) sind Untersuchungsergebnisse dargestellt, die zeigen, dass für die untersuchten Randbedingungen bei einer Aufprallgeschwindigkeit auf harten Oberflächen kleiner 4,6 m/s die Letalität für Fische gleich Null ist, um dann linear auf 50 % bei 15,2 m/s zu steigen.
- Druckunterschiede, hydraulische Gradienten, hohe Turbulenzen oder Scherkräfte sind voneinander abhängige hydraulische Größen, die bei zu großer Ausprägung schädigende Wirkung auf die Fische haben können (Odeh et al. 2002, DWA 2005, USACE 1998). Neben den hydraulischen Größen spielen hier die Fischgröße und welche Körperteile den wirkenden Kräften ausgesetzt sind eine wesentliche Rolle für den Schadensprozess. Da große hydraulische Gradienten an Wehranlagen vor allem in Tosbecken auftreten, wird im DWA-Themenband als Richtwert auf Odeh & Orvis (1998) verwiesen, die ohne weiteren Nachweis ein Beckenvolumen von mindestens 10 m<sup>3</sup> pro 1 m<sup>3</sup>/s Abfluss vorschlagen, ohne dabei die Fallhöhe zu berücksichtigen.
- In DWA (2005) wird darauf hingewiesen, dass eine erhebliche Übersättigung des Wassers mit atmosphärischen Gasen im Unterwasser einer Stauanlage zu Fischschäden führen kann. Es wird jedoch eingeschränkt, dass die überwiegend geringen Stauhöhen europäischer Wasserkraftanlagen erwarten lassen, dass die Auswirkungen dieses Prozesses vernachlässigbar seien.

Für Fische, die eine Stauanlage erfolgreich passiert haben, besteht unterhalb der Stauanlage zudem ein erhöhter Prädationsdruck, da sie infolge der Passage aufgrund hoher Turbulenzen häufig für eine gewisse Zeitspanne desorientiert sind.

Eine erste Bewertung der aufgelisteten Schädigungsprozesse für die Verhältnisse an den Bundeswasserstraßen zeigt, dass weniger die absolute Fallhöhe ein Problem darstellt, als vielmehr das Kollisionsrisiko der Fische mit Bauwerksteilen beim Aufprall des Überfallstrahls im Unterwasser. Hierbei zeigt sich weiterhin, dass die den Empfehlungen zu Grunde liegenden Untersuchungen nicht gut zu den Verhältnissen an den Wasserstraßen passen. Vielmehr sollten die Kenntnisse über die hydraulischen Verhältnisse beim Aufprall des Strahls im Unterwasser besser beschrieben werden, um so die Grundlage für eine fischökologische Einschätzung des Schädigungsprozesses zu verbessern. Weiterhin besteht Bedarf nach fischökologischen Untersuchungen zu Schädigungsprozessen der heimischen Fischarten für die an den Bundeswasserstraßen betriebenen Wehrtypen.

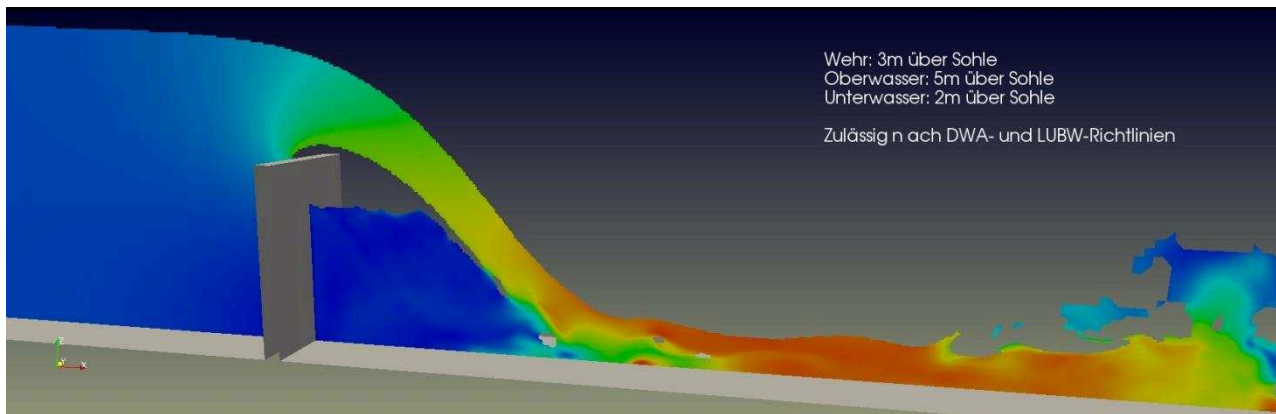
## Hydraulik des Wehrüberfallstrahls

Situationen, die zu einer Gefährdung absteigender Fische führen könnten, treten mit höherer Wahrscheinlichkeit dann auf, wenn der Wehrüberfallstrahl dünn ist im Vergleich zur Wassertiefe und wenn zudem im Unterwasser keine oder nur eine geringe Wasserüberdeckung des Aufprallbereichs ansteht. Bei dickeren Überfallstrahlen ist der Fisch mit höherer Wahrscheinlichkeit in diesen eingebettet und so geringeren Belastungen ausgesetzt. Derzeit werden zur Beurteilung dieser Situation meist die Annahmen aus DWA (2005) verwendet. Diese basieren jedoch auf Überlegungen aus den USA, die nicht für die hydraulische Situation eines Wehrüberfallsstrahls, sondern für das Eintauchen des dünnen Strahls einer Bypass-Leitung in ein flaches Becken entworfen wurden (Odeh & Orvis 1998). Bei Wehranlagen ist der Überfallstrahl jedoch in der Regel breit im Verhältnis zu seiner Dicke. Das verändert die Situation nachhaltig, da der aufprallende Strahl nicht mehr zu allen Seiten, sondern nur noch in Richtung Unterwasser abgeleitet werden kann. Dies kann zu einem Rückstau des Wassers zwischen Aufprallpunkt und Wehranlage führen (gekennzeichnet durch rote Punkte in Bild 1). Damit würde ein abwandernder Fisch nicht mehr unbeeinflusst bis zum Aufprallpunkt transportiert werden, sondern es setzt bereits auf Höhe der roten Punkte eine Abbremsung und Umlenkung ein.



*Bild :1 Wasserrückstau hinter dem Überfallstrahl an der Wehranlage Auxonne (Frankreich).*

Um diesen Effekt weiter zu untersuchen, wurden in der BAW umfangreiche numerische Untersuchungen durchgeführt. Erste Ergebnisse werden hier präsentiert. Basierend auf dem dreidimensionalen numerischen Verfahren OpenFOAM® wurde zunächst ein Prinzipmodell erstellt, das aus einem einfachen, scharfkantigen überströmten Rechteckwehr besteht. Die verwendeten Berechnungsgitter wurden dabei iterativ an die sich ausbildende Strahlgeometrie angepasst, so dass trotz sehr feiner Gitterauflösungen (1,6 cm im Strahlbereich) akzeptable Rechenzeiten erzielt werden konnten. Für dieses System wurden dann bei konstantem Oberwasserstand die Wehrhöhe und der Unterwasserstand variiert, um festzustellen, ob sich der Aufstauereffekt zwischen Aufprallpunkt und Wehranlage reproduzieren lässt und ob das Kriterium aus DWA (2005) bzw. LUBW (2016) geeignet ist, um die Situation zu beurteilen.

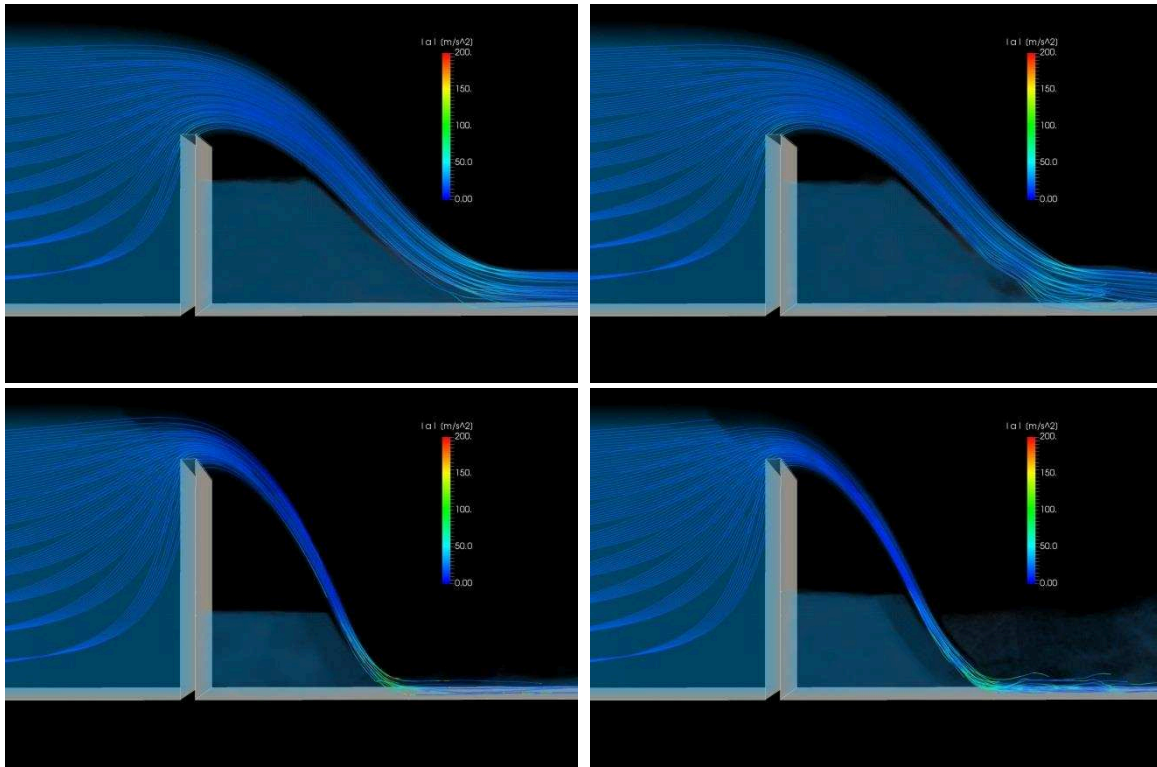


*Bild: 2 Vertikaler Schnitt durch das Modellgebiet mit dargestellter Fließgeschwindigkeit bei Oberwasserstand 5 m, Wehrhöhe 3 m und Unterwasserstand 2 m.*

Dabei zeigte sich, dass in vielen Situationen die in DWA (2005) herangezogene Wassertiefe des Unterwassers nicht das alleinige maßgebliche Kriterium zur Beurteilung sein kann. Bild: 2 zeigt beispielhaft einen Fall, bei dem der starke horizontale Impuls der Strömung das Unterwasser vom Wehrboden verdrängt und somit der eigentlich recht hohe Unterwasserstand allein kein geeignetes Maß für die Gefährdung von Fischen darstellt. In diesem Fall kann wegen der Dicke des Überfallstrahls und wegen des sich bildenden rückwärtigen Wasserpolsters hinsichtlich der Wassertiefen von einer eher unkritischen Situation im Bereich des Strahlaufpralls ausgegangen werden.

Zur weiteren Beurteilung müssen weitere Strömungsgrößen herangezogen werden. Der Betrag der Fließgeschwindigkeit selbst ist kein geeignetes Maß für die Gefährdung von Fischen. Aussagekräftiger können die konvektiven Beschleunigungen oder auch Scherraten der Strömung sein. Bild 3 zeigt die innerhalb von Stromröhren im Überfallstrahl auftretenden konvektiven Beschleunigungen. Diese sind im gezeigten Beispiel weitgehend unabhängig vom Unterwasserstand und hängen stark von der Dicke des Überfallstrahls ab. Die Werte sind mit etwa 5 -10 g bei sehr kurzer Einwirkungsdauer klein und sehr wahrscheinlich weit unterhalb eines möglichen und noch genauer festzulegenden Schwellenwertes.





*Bild: 3 Auswertung der konvektiven Beschleunigungen bei einem Oberwasserstand von 5 m und Wehrhöhen von 3 m (oben) und 4 m (unten) sowie Unterwasserständen von 0 m (links) und 2 m (rechts).*

Die Übertragung der so gesammelten Erkenntnisse auf andere Wehrtypen muss sorgfältig überprüft werden. Erste Modellrechnungen mit Schlauchwehren haben bspw. gezeigt, dass der hier beschriebene Aufbau eines Wasserpolsters bei größeren Überströmungshöhen ähnlich funktioniert, die aufgesetzten Strahlaufreißer bei geringen Überströmungshöhen jedoch eine Separierung des Überfallstrahls in viele Einzelstrahlen erzwingen und so die Wirkung des Wasserpolsters verringern. Hier kann als Beurteilungskriterium beispielsweise der Geschwindigkeitsanteil orthogonal zur Betonoberfläche ausgewertet werden. Nach USACE (1991) ist bei einer Aufprallgeschwindigkeit auf harte Oberflächen kleiner 4,6 m/s die Letalität für Fische gleich Null, um dann linear auf 50 % bei einer Aufprallgeschwindigkeit von 15,2 m/s zu steigen. Um dieses Kriterium zu nutzen, wurden für ein untersuchtes Schlauchwehr die vertikalen Anteile der Strömungsgeschwindigkeit im Bereich des Überfallstrahls ausgewertet und auf den Stromlinien dargestellt (Bild 4).



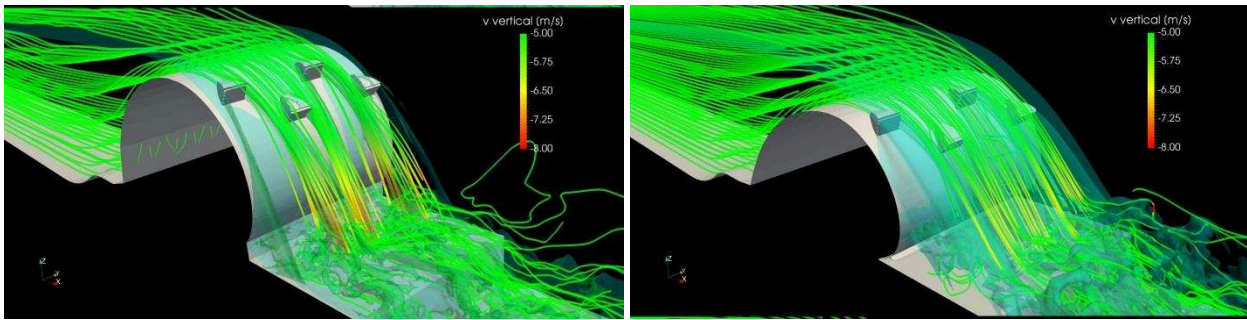


Bild 4: Auswertung der Vertikalanteile der Strömungsgeschwindigkeit bei einem Schlauchwehr mit Höhe 3,78 m (links) bzw. 3,16 (rechts) über dem Ablagetisch.

Hierbei zeigt sich, dass bei einer geringen Überfallhöhe von 0,5 m (Bild 4 links) ein Großteil des Wassers eine Vertikalgeschwindigkeit von etwa 7 m/s erreicht. Wenn man annehmen würde, dass Fische mit dieser Geschwindigkeit aufprallen, würde dies nach USACE (1991) einer Letalität von etwa 12 % entsprechen. Tatsächlich wird das Fluid aber zusammen mit dem Fisch vor der Oberfläche abgebremst und umgelenkt, so dass diese Annahme auf der ungünstigen Seite liegt. Bei der größeren betrachteten Überfallhöhe von 1,2 m sind die Vertikalgeschwindigkeiten mit 6 m/s - 6,5 m/s geringer. Die Umrechnung in Letalitäten nach USACE (1991) würde etwa 8 % ergeben. Dies überschätzt vermutlich die Gefährdung jedoch deutlich, da der Fisch in einen dickeren Strahl eingebettet ist und zudem die Geschwindigkeiten zur Betonoberfläche hin stark abnehmen.

### Schlussfolgerungen und Fazit

Für die Einhaltung der gesetzlichen Verpflichtungen aus dem Wasserhaushaltsgesetz, wie auch zur Gewährleistung der Nachhaltigkeit der beim Fischaufstieg getätigten Investitionen, spielt die Sicherstellung eines funktionierenden Fischabstiegs an den Wehranlagen der Bundeswasserstraßen eine wichtige Rolle. Aus diesem Grund ist der Fischabstieg an Wehranlagen bei der Planung von Wehersatzmaßnahmen ein wesentliches und frühzeitig zu berücksichtigendes Thema.

Diesem klar formulierten Bedarf steht ein vergleichsweise geringer Kenntnisstand über die maßgebenden Prozesse gegenüber. So sind zwar Bauweisen zur Gewährleistung eines Fischabstiegs (Bypässe) bekannt und es liegen für die Verhältnisse an Wasserkraftanlagen auch Erfahrungen zur Funktionsfähigkeit vor, jedoch bestehen grundlegende Wissenslücken, für welche Randbedingungen Bypässe an Wehranlagen erforderlich sind und wann von einem schädigungsfreien Abstieg der Fische bei Beaufschlagung der Wehre ausgegangen werden kann. Die in der Literatur existierenden Kriterien zur Einschätzung eines Risikos beim Fischabstieg basieren dabei auf wenigen Untersuchungen, die zudem von den Verhältnissen an Bundeswasserstraßen abweichen. Erste hydraulische Untersuchungen für den Überfallstrahl zeigen, dass die Situation je nach Ausprägung des Verschlussorgans wie auch des Unterwassers nicht mit den vereinfachten Kriterien aus der Literatur beschreibbar ist. Vielmehr sollten auf Basis weiterer Untersuchungen Kriterien entwickelt werden, die besser zu den an Bundeswasserstraßen verwendeten Wehrtypen passen.

Der vorliegende Beitrag verdeutlicht zudem den dringenden Bedarf nach fischökologischen Studien, die sowohl das Verhalten der Fische im Oberwasser einer Stauanlage bzw. eines Wehrkörpers wie auch die Schädigungsmechanismen beim Abstiegsvorgang im Fokus haben.

## Literatur

- Aster, D.; Ernst, A. (2016): Steuerung der Maßnahmen zur Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit an Bundeswasserstraßen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hrsg.): Schlüsselfragen bei der Umsetzung von Maßnahmen zum Fischaufstieg. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW); Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). S. 7-12.
- Boes, R.M.; Albayrak, I.; Kriewitz C.R.; Peter, A. (2016): Fischschutz und Fischabstieg mittels vertikaler Leitrechen-Bypass-Systeme: Rechenverluste und Leiteffizienz, *WasserWirtschaft*, 106 (7-8): 29-35, Wiesbaden: Vieweg & Teubner Verlag.
- DWA (2005): Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen, Themenband, ISBN 3-934063-91-5.
- Lehmann, B., Adam, B., Engler, O., Hecht, V., Schneider, K. (2016): Untersuchungen zum Orientierungs- und Suchverhalten abwandernder Fische zur Verbesserung der Dimensionierung und Anordnung von Fischschutzeinrichtungen vor Wasserkraftanlagen. – Abschlussbericht F&E-Projekt des Bundesamt für Naturschutz, UFOPLAN FKZ 3513 85 0300.
- LUBW (2016): Handreichung Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, September 2016.
- MUNLV (2005): Handbuch Querbauwerke, ISBN 3-9810063-2-1.
- Odeh M., Orvis C. (1998): Downstream fish passage design considerations and developments on hydroelectric projects in the north-east USA. - In: Jungwirth, M. et al. (Hrsg.): Fish migration and fish bypasses. - Oxford (Fishing News Books), 67 - 280.
- Odeh M., Noreika J., Haro A., Maynard A., Castro-Santos T., Cada G. (2002): Evaluation of the effects of turbulence on the behavior of migratory fish, Final Report, USGS/ORNL, March 2002.
- UBA (2015): Forum „Fischschutz und Fischabstieg“ – Synthesepapier, Empfehlungen und Ergebnisse, <http://forum-fischschutz.de>, 42. S.
- USACE (1991): Fisheries Handbook of Engineering Requirements and Biological Criteria, Milo C. Bell, US Army Corps of Engineers, North Pacific Division.
- USACE (1998): Annotated Bibliography of Literature Regarding Mechanical Injury with Emphasis on Effects from Spillways an Stilling Basins, Final Report, US Army Corps of Engineers, Portland District.

## **Über den Wert von Naturdaten für die Aufgaben der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung**

Dipl.-Ing. Petra Herzog, Bundesanstalt für Gewässerkunde

### **Einleitung**

Das Begreifen der Vorgänge in der Natur ist ein uraltes menschliches Interesse. Bereits im alten Ägypten vor unserer Zeitrechnung wollten die Menschen wissen, wann der Nil ihre Felder überschwemmt und begannen, die unterschiedlichen Wasserstände in den Jahreszeiten zu verfolgen. Über die Jahrhunderte hat sich das Interesse aus den unterschiedlichsten Motivationen heraus verstärkt und führte zu einer Entwicklung der Beobachtungs-, Mess- und Auswertetechnik derartiger Naturereignisse. Der Wert von Naturdaten orientiert sich dabei vor allem an dem Nutzen oder der „Inwertsetzung“, eine entsprechende Aufgabenstellung erfüllen und ungelöste Fragen beantworten zu können. Während Werte eher für ideale Normen oder Wertvorstellungen stehen, meint „Inwertsetzung“ dabei den konkreten aufgabenbezogenen Nutzen.

Im heutigen Vortrag soll der Schwerpunkt auf der Diskussion liegen, wofür, welche Naturdaten, in welcher Qualität erhoben werden und welcher Nutzen bzw. „Inwertsetzung“ sich daraus ableitet.

### **Wofür werden Naturdaten erhoben?**

Der Nutzen der Erhebung von Naturdaten für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) orientiert sich an den von ihr zu erfüllenden Aufgaben, die sich grob gliedern lassen in:

- Unterhaltung, Ausbau und Neubau von Bundeswasserstraßen
- Unterhaltung und Betrieb von Schleusen, Wehren, Revierzentralen und Schifffahrtszeichen an den Bundeswasserstraßen, dabei Erfüllung aller Anforderungen an Sicherheit und Ordnung
- Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit an staugeregelten Bundeswasserstraßen
- Sicherung des Verkehrsweges Wasserstraße sowie Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs

In Bezug auf die Erhebung von Naturdaten kommt dem Bereich Unterhaltung und Ausbau inklusive Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit eine besondere Bedeutung zu. Um die Auslegung der Unterhaltung näher zu spezifizieren, hat das zuständige BMVI auch Leitlinien für die Unterhaltung an Bundeswasserstraßen erlassen (BMVI, 2015). Demnach steht eine nachhaltige Nutzung der Wasserstraßen im Focus, sodass die Aufgabe der WSV über die Erfüllung ihrer verkehrlichen Interessen hinaus auch aktive Beiträge zur Erreichung ökologischer und wasserwirtschaftlicher Zielstellungen erfasst. Durch die Verbesserung der strukturellen Bedingungen an Bundeswasserstraßen durch Unterhaltungsmaßnahmen und durch die Beachtung gewässerqualitätsbezogener Handlungsziele z.B. im Rahmen des Baggergutmanagements kann auch die WSV die Zielerreichung der Wasserrahmenrichtlinie unterstützen. Außerdem ist die WSV auch gehalten, die Regelungen des Artenschutzes und der NATURA 2000- Richtlinie zu beachten.

Dies bedeutet folglich auch, dass die WSV zur Erfüllung ihrer Aufgaben grundsätzlich über physikalische, chemische, hydrologische, hydro- und topographische, morphologische - sedimentologische und biologische Naturdaten verfügen muss.

Der tatsächlich zu erhebende Umfang und die Qualität der Daten wird durch die jeweiligen Ziele bestimmt. Dabei erfasst die WSV vor allem physikalische, hydrologische und hydrographische Daten selbst, biologische und chemische Parameter werden durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) oder durch die von ihr Beauftragten erhoben. Topographische sowie morphologische und sedimentologische Daten werden abhängig von der Aufgabenstellung durch die WSV oder die BfG und deren Beauftragte aufgenommen. Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) erhebt v.a. Daten in Bezug zu bau, geo- und strömungstechnischen Fragestellungen sowie zum Systemverständnis Schiff- Wasserstraße.

Die Bestimmung der Naturdaten ergibt einen Messwert an sich, der als Einzelparameter ein erstes Indiz gibt. Oftmals werden aus diesen Einzelmesswerten entweder in der langjährigen Reihe oder in Kombination mit anderen Parametern Produkte bzw. Ergebnisse abgeleitet. Diese dienen z.B. bei der Unterhaltung der Wasserstraße als Basiskriterium für die Entscheidung pro oder kontra verschiedener Maßnahmen und deren zeitlicher Einordnung.

Die Erhebung von Naturdaten dient aber nicht nur der Beschreibung der IST- Situation, sondern liefert bei regelmäßigem Monitoring während und nach umgesetzten Maßnahmen Indikatoren für den Erfolg (Erfolgskontrolle).

Es ist ein Element der „Daseinssicherung und -vorsorge“, Naturdaten laufend aktuell zu erheben und in entsprechenden Wissenssystemen vorzuhalten.

Naturmessungen sind schließlich Grundlage jedes Modellaufbaus und der Simulation. Ohne entsprechende Messdaten kann kein Modell kalibriert und validiert werden. Die Güte und Aussagekraft eines Modells steht und fällt mit der Verfügbarkeit und Verlässlichkeit dieser Daten. Modelle können als bestmögliche Interpretation innerhalb bekannter gemessener Daten aufgefasst werden. Modelle größerer Komplexität erfordern deshalb in der Regel auch vermehrt gemessene Daten. (Maurer, 2016).

Über die Modellierung können auch bestimmte Systemzusammenhänge verdeutlicht werden. In Abhängigkeit von der Modellarchitektur sind Auswirkungen von geplanten Maßnahmen, Bewirtschaftungsaussagen, oder auch Prognosen für zukünftige Entwicklungen möglich.

Für den Bereich des Ausbaus der Bundeswasserstraßen sind heute zunehmend komplexere Fragestellungen gerichtsfest zu beantworten. Ohne Naturdaten als Basis für weitere Produkte, Modelle und vor allem Aussagen hinsichtlich verschiedener Wirkungszusammenhänge, kann kein Planverfahren erfolgreich abgeschlossen werden. Dazu gehören nicht nur die Aufnahmen des Ist- Zustandes und die Modellierung geplanter Szenarien, sondern auch Auswirkungsprognosen und Aussagen im Hinblick auf die Gesetzeskonformität.

### Welche Naturdaten werden erhoben?

Im Folgenden werden exemplarisch, ohne Anspruch auf Vollständigkeit wichtige, zu erhebende Naturdaten genannt. Diese Aufzählung beinhaltet sowohl Daten, die direkt in der Natur gemessen werden, als auch wichtige Parameter z.B. für Kartierungen oder Spezies.

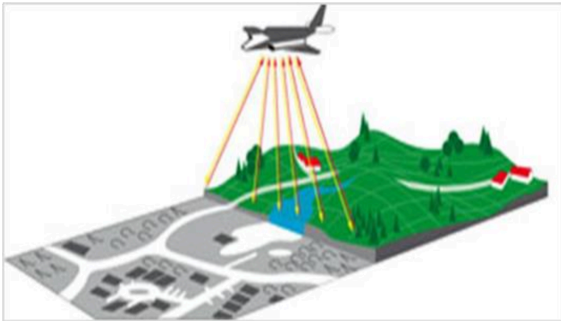
Wasserstand, Abfluss, Wasserspiegel, Strömung, Fließzeit, Seegang/ Wellen, Grundwasser  
Schwebstoff, Geschiebe, Sohle/ Gewässerbettstruktur, Korngrößenfraktionen;  
Ufer- und Geländestruktur, Bodentextur;  
Lage- und Höhenkoordinaten, Bauwerksdaten;  
Temperatur, Niederschlag, Bodenfeuchte, Luftdruck, Sonneneinstrahlung;  
Leitfähigkeit, pH- wert, Sauerstoff, Nährstoffe, Radioaktivität, prioritäre und flussgebietspezifische Stoffe;  
Phytoplankton, Zooplankton, Makrozoobenthos, Fische, Vegetation.

Im Beispiel des Projektes „Erfolgskontrolle Rhein“ werden nicht nur die erhobenen Naturdaten, sondern ihr Zusammenwirken und ihre Auswirkungen im großräumigen Maßstab des deutschen frei fließenden Rheins dargestellt (WSV, Arbeitsgruppe EKR, 2016). Damit sollen alle hydrologischen, hydraulischen, morphologischen, ökologischen und nautischen Wechselwirkungen und durchgeführte Baumaßnahmen abgebildet werden. Die Aussagen dieses Berichtes sind Grundlage für die zu erstellende Konzeption und die Haushaltsunterlage. Sie bilden die fachliche Basis für Maßnahmen am Rhein und sind als Erfolgskontrolle eine Daueraufgabe. In diesem Zusammenhang wurde auch auf die Umsetzung der bestehenden Konzepte zum Messwesen (Fachkonzept für hydrologische Messungen am Rhein, Fachkonzept Peilwesen) abgestellt. Bereits 2003 wurden in der „Studie zur Durchführung einer Erfolgskontrolle des Geschiebemanagements am Rheinstrom“ (WSÄ Freiburg, Mannheim, Bingen, Köln, Duisburg- Rhein, 2003), die 2005 in das „Gesamtkonzept zur Durchführung einer Erfolgskontrolle des Geschiebemanagements am Rheinstrom“ (Projektgruppe Erfolgskontrolle des Geschiebemanagements am Rhein, 2005) mündete, dezidiert in einer tabellarischen Zusammenfassung für die Bereiche Hydrografie, Hydrologie, Morphologie und Sedimentologie die Messstellen identifiziert, die Häufigkeiten, das Messverfahren, die Datenplausibilisierung -aufnahme und -archivierung festgelegt. Ergänzt durch die Themen Baumaßnahmen, Schifffahrt, und Ökologie wurden fachgebietsübergreifende Auswertungen abgeleitet und der Aufbau eines fachbezogenen Informationssystems begründet.

Parallel zu diesen Entwicklungen wurde für den Bereich des frei fließenden Rheins von Iffezheim bis Bonn 2005 erstmals ein digitales Geländemodell (DGM) erstellt, das im Anschluss durch ein weiteres DGM für den Niederrhein ergänzt wurde. Mittlerweile ist der Aufbau eines Digitalen Geländemodells des Rhein- Wasserlaufes – 2020 (DGM- W Rhein-2020) in Bearbeitung, das sich in die Teilprojekte Geotopographie und Gewässervermessung gliedert. Die Geländedaten werden durch eine Airborne Laserscannerbefliegung und einen photogrammetrisch auswertbaren Bildflug aufgenommen, ergänzt durch verschiedene topografische Aufnahmen in den Brückenbereichen.



Die Gewässerbetrierfassung erfolgt über Fächerlotaufnahmen sowohl im Fahrwasser als auch in den Bühnenbereichen bis zur Wasserwechselzone (Brockmann, Hildebrandt, 2016).



Quelle: uni Wissen, Uni Freiburg 03/2011



Bild 1: Airborne- Laserbefliegung

Bild 2: Fächerecholotpeilung mit Peilschiff

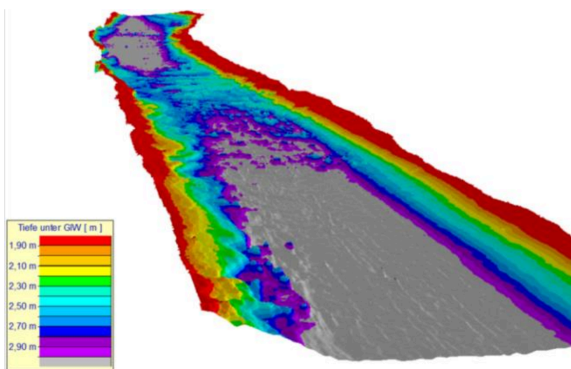


Bild 3: ausgewertete Fächerecholotaufnahme



Bild 4: abgeleitete Buhndokumentation, (Brockmann, 2016)

Die beispielhaft beschriebenen Projekte am Rhein verdeutlichen, in welchen vielschichtigen Facetten und für welche Aufgaben Naturdaten notwendig sind und welche „Inwertsetzung“ daraus ableitbar ist.

### Welche Anforderungen müssen Naturdaten erfüllen, um eine „Inwertsetzung“ zu erreichen?

In der heutigen Welt stehen ein umfangreiches und spezialisiertes Wissen und die dazugehörigen Verfahren und Instrumente zur Verfügung, um Daten in der Natur zu erheben. Dabei ist es nicht nur wichtig zu entscheiden, welche Daten für welchen Zweck aufgenommen werden sollen, sondern vor allem nach welchen Qualitätskriterien dies zu erfolgen hat, um auch die gewünschte „Inwertsetzung“ zu erreichen.



Für die Aufgaben der WSV gibt es in vielen Bereichen eingeführte Leitfäden, Handbücher oder durch Qualitätszirkel und Fachkonzepte festgelegte Standards. Darin ist i.d.R. beschrieben,

in welchen Abständen zur Repräsentanz welcher Epochen,  
mit welcher räumlichen Abdeckung und Georeferenzierung,  
mit welchen Genauigkeiten,  
welche Daten

zu erheben, zu plausibilisieren, auszuwerten und wie vorzuhalten sind. Die Erarbeitung derartiger Standards ist in der Regel vom BMVI beauftragt. Sie erfolgt oftmals durch Experten- und Arbeitsgruppen oder durch Qualitätszirkel. Darin ist die WSV als Anfordernder mit dem Bezug zur Praxis vertreten. Durch die interdisziplinäre und an anwendungsbezogener Forschung ausgerichtete Arbeit der Bundesanstalten leisten BfG und BAW den fachwissenschaftlichen Input und setzen den Standard zur Qualitätssicherung bei der Erarbeitung derartiger Regelwerke. Diese werden bei Bedarf fortgeschrieben und aktualisiert.

Um diese Aufgaben qualitätsgesichert und in entsprechenden Zeitraum auch abarbeiten zu können, bedarf es neben den klaren Standards ausreichender Haushaltsmittel und vor allen Dingen Fachpersonal, dem auch die zeitlichen Ressourcen dafür zugewiesen sind. Ohne ausreichendes Fachpersonal in der WSV, in BAW und BfG ist andernfalls die Aufgabenerledigung gefährdet.

### **Zusammenfassung**

Die qualitätsgesicherte, homogene und bedarfsgerechte Erfassung von Naturdaten der Wasserstraßen ist sowohl eine Kernaufgabe der WSV als auch der BfG und BAW. Sie stellt eine Grundvoraussetzung dar, um im Kontext der Aufgaben der WSV eine „Inwertsetzung“ zu erzielen. Diese „Inwertsetzung“ spiegelt sich in folgenden Komponenten wider:

- Beschreibung des IST – Zustandes
- Laufendhaltung aktueller Daten in Systemen als Daseinsvorsorge
- Dokumentation der Entwicklung während und nach umgesetzten Maßnahmen sowie Erfolgskontrollen
- Modellierungsgrundlage

Aus der Bearbeitung dieser Komponenten abgeleitet, lassen sich weitere „Inwertsetzungen“ identifizieren:

- Erkenntnisgewinn für Systemzusammenhänge
- Abbildung des Prozessverständnisses
- Aussagen im Hinblick auf Gesetzeskonformität
- Erstellung von Vorhersagen
- Darstellung von Auswirkungsprognosen

**Literatur:**

- Brockmann, H. Hildebrandt, C. (2016): Aufbau eines Digitalen Geländemodells des Rhein - Wasserlaufes – 2020 (DGM- W Rhein 2020), Präsentation zur Auftaktbesprechung.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2015): Leitfaden Umweltbelange bei der Unterhaltung.
- Maurer, T. (2016): „Modellierung – Die Kunst bestmöglicher Interpolation zwischen und Extrapolation von Messdaten und Szenarien (BfG - Veranstaltungen 2016).
- Projektgruppe Erfolgskontrolle des Geschiebemanagements am Rhein, (2005): Gesamtkonzept zur Durchführung einer Erfolgskontrolle des Geschiebemanagements am Rheinstrom.
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung, Arbeitsgruppe EKR (2016): Erfolgskontrolle Rhein am gesamten frei fließenden Strom, Statusbericht 2015.
- Wasser- und Schifffahrtsämter Freiburg, Mannheim, Bingen, Köln, Duisburg,- Rhein, (2003): Studie zur Durchführung einer Erfolgskontrolle des Geschiebemanagements am Rheinstrom.

## **BIM, WInD und Co. – Digitalisierung im Verkehrswasserbau**

Dr.-Ing. Jörg Bödefeld, Bundesanstalt für Wasserbau

### **Einleitung**

*Industrie 4.0* ist der Überbegriff für eine Effizienzsteigerung mit moderner Informations- und Kommunikationstechnik. Zur Nutzung der Potentiale soll mit *Planen und Bauen 4.0* die Technologie an das Bauwesen angepasst werden. Der Vortrag beleuchtet einige dieser Potentiale im Kontext von Neubau, Betrieb und Unterhaltung von Verkehrswasserbauwerken. Erste Ansätze werden vorgestellt, wobei neben den aktuellen Möglichkeiten der Informationstechnik auch die Datenbeschaffung und Datenpflege berücksichtigt werden. Die nächsten Schritte sowie sich ergebende Perspektiven werden aufgezeigt.

### **Hintergrund**

Zwischen dem Beginn der breiten Nutzung von mobilen Telefonen und der Verwendung von leistungsstarken Smartphones sind nur wenige Jahre vergangen. Eine ähnliche Zeitspanne verging zwischen dem Aufkommen der ersten satellitengestützten Navigationsgeräte und der Entwicklung von sprachgesteuerten Multifunktionsgeräten mit Internetverbindung für die Benzinpreisrecherche, Traffic Message Channel (TMC) für Staumeldungen, Fahrspurassistent und Reality-View. Im privaten Bereich ist die Digitalisierung weit fortgeschritten. Der direkte Nutzen, der sich für den Verbraucher bei der Verwendung der digitalen Technik ergibt, sowie die für den Einzelnen relativ geringen Investitionen haben zu einer rasanten Verbreitung und Weiterentwicklung geführt.

Demgegenüber liegen in der Arbeitswelt noch viele Potentiale brach, obwohl es entsprechende Ansätze gibt. In den USA wurde gegen Ende der 1990er Jahre der Begriff des *Internets der Dinge* geprägt. Dahinter verbirgt sich ein Online-Monitoring, bei dem relevante Kennwerte von Maschinen und Geräten in Echtzeit auf eine virtuelle Repräsentanz übertragen werden, so dass die entsprechenden Maschinen und Geräte permanent im Internet überwacht werden können.

Im deutschsprachigen Bereich hat sich der Begriff *Industrie 4.0* durchgesetzt, der mehr darauf abzielt, die Prozesse zu digitalisieren, die Maschinen und Geräte miteinander zu vernetzen und Datenflüsse zu betrachten. Somit sollen die Maschinen und Geräte nicht nur Informationen zur Verfügung stellen, sondern selbst auch relevante Informationen aus anderen Quellen nutzen.

4.0 verweist zum einen durch die bei der Software-Versionierung übliche Nummerierung auf die starken digitalen Aspekte, zum anderen auf die Bedeutung der Veränderung, die als vierte industrielle Revolution bezeichnet wird. Die erste industrielle Revolution erfolgte mit der Einführung von Maschinen, die Arbeit von Mensch und Tier ersetzen konnten. Während der zweiten industriellen Revolution wurde die Massenproduktion entwickelt, maßgeblich durch die Einführung von Fließbändern unter Verwendung elektrischer Energie. Die Produktionsprozesse änderten sich dabei signifikant. Die Digitalisierung gegen Ende des letzten Jahrhunderts wird als dritte industrielle Revolution bezeichnet.

Bei der vierten industriellen Revolution werden die digitalen Komponenten nun vernetzt und Informationen untereinander ausgetauscht, was wiederum starke Einflüsse auf die Prozesse hat, vergleichbar mit der zweiten industriellen Revolution. Ziel und Motivation aller industriellen Revolutionen war eine Effizienzsteigerung und eine damit einhergehende Gewinnsteigerung.

Die Arbeitsprozesse im Bauwesen - von der Planung über den Bau bis zur Nutzung - haben von den industriellen Revolutionen unterschiedlich profitiert. Während die erste industrielle Revolution mit der Einführung von Maschinen die Bauprozesse signifikant verändert hat, ist eine Massenproduktion in der Baubranche nur im Ansatz umgesetzt worden, z.B. bei Fertighäusern oder Fertigteilen. Die dritte industrielle Revolution mit der Digitalisierung einzelner Komponenten hat das Bauwesen wiederum stärker verändert. In der Planungsphase sind heute Softwarekomponenten wie CAD, FEM und Ausschreibungsprogramme weit verbreitet. Baumaschinen werden digital gesteuert und überwacht. In der Betriebsphase unterstützen Facility Management Tools die Arbeit.

Der Versuch, die vierte industrielle Revolution im Bauwesen umzusetzen, wird vielfach Building Information Modeling, kurz BIM, genannt. Besser passt der Begriff *Planen, Bauen und Betreiben 4.0*.

### **Prozesse im Verkehrswasserbau - status quo**

Prozesse im Bauwesen stellen eine auf den Bauwerkslebenszyklus bezogene Wertschöpfungskette dar. Die Prozesskette besteht aus den Tätigkeiten Planen und Genehmigen, Bauen sowie Betreiben. Viele der zugehörigen Einzelprozesse werden bei der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) inzwischen digital bearbeitet. Neben der allgemeinen Verwendung von Bürokommunikationssoftware wie Word und Excel erfolgt die Kommunikation häufig über Email, pdf ist ein gängiges Dateiformat für den Austausch und die Archivierung von Dokumenten. Für den Austausch von Daten stehen cloud-ähnliche Plattformen zur Verfügung. Im Rahmen der Planung kommt eine Vielzahl von IT-Anwendungen zum Einsatz: CAD für die Erstellung von Plänen, FEM für die Berechnung von Verformungen und Strömungen um nur einige zu nennen. Der gesamte Prozess von Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung wird durch eine Software durchgängig unterstützt. Auch die Anlagenbuchhaltung erfolgt digital. Bereits heute greifen teilweise mehrere IT-Anwendungen auf dieselben Daten zu. Darüber hinaus sind verschiedene IT-Anwendungen über Schnittstellen verbunden.

Überwiegend ist die IT-Landschaft der WSV jedoch von Insel-Lösungen geprägt.

Diese sind historisch gewachsen und unzureichend miteinander vernetzt. So erfolgt die Kommunikation zwischen Planung und Bauprozess über ausgedruckte Pläne, was auch ein 3D-Modell wiederum auf 2D reduziert. Zur Übergabe in den Betrieb werden Bestandspläne in der entsprechenden Datenbank archiviert, wobei hier eine digitale Übergabe aus der Planung möglich ist. Relevante Informationen müssen in die Bestandsdatenbank eingegeben werden, die Abrechnungsdaten werden manuell in die Anlagenbuchhaltung eingepflegt, obwohl die Informationen bereits bei der Ausschreibung digital verarbeitet werden. Für die Inspektion muss ein Bauwerk in der Inspektionssoftware angelegt werden.

Diese Aufzählung ließe sich beliebig erweitern. Die dritte industrielle Revolution ist in der WSV vielfach angekommen. Der nächste Schritt ist konsequenterweise die Vernetzung der Insellösungen. Darin liegt das Potenzial von *Planen, Bauen und Betreiben 4.0*.

### **Aktuelle Ansätze**

Im Fokus von *Planen, Bauen und Betreiben 4.0* stehen die Infrastrukturobjekte und die damit verbundenen Aufgaben. Eine erste Analyse hat sehr schnell gezeigt, dass das vorhandene Objektkataster der WSV als Rückgrat aller weiteren Verfahren im Hinblick auf IT-Architektur, Datenqualität und Datenquantität den heutigen Anforderungen nicht genügt. Somit wurde das Projekt WInD (**W**asserstraßen-**I**nfrastruktur **D**aten) zur Neugestaltung des Objektkatasters der WSV aufgesetzt. Leitgedanke der Neugestaltung ist eine klare Trennung der Daten in Grunddaten und Fachdaten. Das Herzstück der Grunddaten sind die Geodaten, d. h. die Daten, die die räumliche Lage des Objektes bzw. Objektteiles beschreiben und der eindeutigen Referenzierbarkeit dienen. Fachdaten werden nach Inhalten geclustert in verschiedenen fachspezifischen Datenbanken gehalten. Die Aufteilung der Daten in Fachdatenbanken erleichtert u. a. die Zuweisung der Datenverantwortung. Aktuell sich abzeichnende Fachdatenbanken werden z. B. bautechnische Fachdaten, schiffahrtsrelevante Daten und Korrosionsschutzdaten sein.

Die Struktur für die Softwarearchitektur von WInD entspricht einem Schichtenmodell bestehend aus Datenhaltungsschicht, Datenzugriffsschicht, Anwendungsschicht und Präsentationsschicht. Das zugrunde liegende Datenmodell bietet aufgrund seiner schemabasierten Beschreibung die Möglichkeit der Versionierung, d. h. es werden, um Probleme mit externen Anwendungen zu vermeiden, neben der aktuellen die jeweilige Vorgängerversion des Datenmodells vorgehalten. Die WInD-Applikation bietet komfortable Möglichkeiten für die Auswertung und Visualisierung der Daten unter Verwendung existierender Web Map Services (WMS) der WSV wie z. B. den DBWK2-WMS und den BWaStr-WMS. Für den Datenaustausch mit anderen Systemen wird WInD SOAP und REST-Schnittstellen anbieten, mit deren Hilfe Daten anderen Anwendungen auf standardisierte und transparente Weise zur Verfügung gestellt werden.

Ein weiteres aktuelles Projekt im Kontext der Digitalisierung ist DIBS (**D**aten der **I**nfrastrukturobjekte an **B**undeswasserstraßen). DIBS hat die Erschließung und Vernetzung von bereits vorhandenen Informationen und zukünftig zu erwartenden Informationen zum Ziel. Damit verbunden ist die Bereitstellung der Daten für Betrieb und Unterhaltung, Forschung, Entwicklung und die Fachöffentlichkeit sowie für die interessierte Öffentlichkeit. In einem ersten Schritt entsteht eine „Datenlandkarte-Bauwerksbestand“, die neben allen vorhandenen und zu erwartenden Systemen auch aktuell unentdeckte Dateninseln berücksichtigt. Potentielle Anforderungen werden im Rahmen einer Nutzeranalyse erhoben, dokumentiert und - soweit sinnvoll - ergänzt. Das Ergebnis mündet in ein Konzept zum konsistenten Datenmanagement und zur Datenbereitstellung, das die adressierten Verfahren integriert. Die Bereitstellung der Ergebnisse erfolgt in vorhandenen Portalen entsprechend der OpenData-Initiative des Bundes bzw. zukünftigen gesetzlichen Regelungen.

BIM (**B**uilding **I**nformation **M**odeling) ist aktuell der prominente Begriff für die Digitalisierung des Bauwesens, BMVI(2015-2). Häufig auf dreidimensionale Darstellung der Bauwerke reduziert ist der eigentliche Kern der Methodik die mit dem Begriff Industrie 4.0 verbundene Digitalisierung der Prozesse. Nur so können die im Planungsprozess bei Großprojekten identifizierten Probleme beseitigt werden, BMVI (2015-1), GDWS (2014). Der wichtigste Bestandteil dieser Methode ist daher die prozessorientierte Modellierung der Abläufe beim Planen, Bauen und Betreiben. Die Prozessmodellierung dient der Identifikation der Beteiligten, deren Rollen innerhalb der Prozesse, der Interaktionen zwischen den Beteiligten und letztendlich der auszutauschenden Informationen. Sind diese Informationen im Prozesskontext dokumentiert, sortiert und strukturiert, können Datenaustauschanforderungen formuliert werden. Die BIM-Methode kann dann dazu beitragen, die durch bisherige Softwarelösungen vorhandenen Inseln miteinander zu vernetzen. Die Voraussetzung dafür ist aber ein Prozessstandard, der Datenaustauschszenarien und Umgangskonventionen beinhaltet. Hier liegen noch Defizite vor. Die zweite industrielle Revolution, die Produktionsprozesse standardisiert hat und damit Grundlage für eine Serienfertigung war, ist im Bauwesen weder im Bauprozess selbst noch im Planungsprozess angekommen.

Das Planfeststellungsverfahren (PFV) wurde von GDWS (2014) als verantwortlich für Zeitverzögerungen bei Großprojekten identifiziert. Als Ziel wird ein einheitlicher Standard innerhalb der WSV formuliert. Zur Veranschaulichung des Potenzials der Digitalisierung soll ein Teilprozess dienen. So wird das für das PFV erforderliche Bauwerksverzeichnis der betroffenen Wasserstraßenabschnitte in einem Neubauprojekt aufwendig neu erfasst, da es für die Organisation und Dokumentation der festgestellten Maßnahmen erforderlich ist. An dieser Stelle ist es mit einem funktionierenden System WInD möglich, das Bauwerksverzeichnis aus WInD zu generieren. Umgekehrt können die für den Betrieb relevanten Bestandsdaten während der Planung oder Durchführung einer Maßnahme an WInD übergeben werden. Eine einheitliche Objektstruktur mit eindeutiger Identifizierung der Objekte bzw. Objektteile ist dafür aber essentiell.

Ein weiteres Beispiel sind Kostenansätze, die in unterschiedlichen Projektstadien erforderlich sind, aktuell aber aus den Erfahrungen Einzelner bzw. einzelner Dienststellen generiert werden. Auf der anderen Seite bietet die Software für Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung in einer Zentralinstallation Auswertemöglichkeiten, die die Grundlage für die Aufstellung eines Kostenindex für Verkehrswasserbauwerke bilden. Voraussetzung dafür ist aber die weitestgehende Verwendung von Standardleistungskatalog-Positionen in der Ausschreibung, eine einheitliche Objektteilgliederung und eine konsequente Anwendung der Software. Alle diese Punkte weisen noch erhebliche Potentiale auf.

Im Fokus aller aktuellen Ansätze im Zusammenhang mit der Digitalisierung im Verkehrswasserbau stehen die Vermeidung von Datendoppelhaltung und der damit verbundenen Mehrarbeit sowie die Integration der Datenbeschaffung und -pflege in bestehende Geschäftsprozesse. Dass Daten von einer IT-Anwendung in eine andere über Formulare oder Excel-Dateien übergeben werden, soll der Vergangenheit angehören.



## **Fazit**

Digitalisierung ist in aller Munde und eines der großen Schlagworte der Gegenwart. Digitalisierung heißt nicht nur digital anstelle von analog. Die Digitalisierung hat ein viel größeres Potential. Konsequenterweise umgesetzt ist mit Digitalisierung die Veränderung von Prozessen verbunden - und damit die Chance, diese zu verbessern und zukunftsfähig zu machen. Aber es sind entsprechende Anstrengungen erforderlich sowie eine strukturierte, weitblickende Organisation von Abläufen und Datenflüssen, um das Potenzial auszuschöpfen. Im Endergebnis werden die Informationen an ihrer Quelle digital erfasst, Nutzern bedarfsorientiert zur Verfügung gestellt und im Rahmen der Prozesse automatisch bei der Bearbeitung gepflegt - aktuell, transparent und redundanzfrei.

## **Literatur**

- BMVI (2015-1): Reformkommission Bau von Großprojekten - Endbericht. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berlin.
- BMVI (2015-2): Stufenplan Digitales Planen und Bauen. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berlin.
- GDWS (2014): Arbeitsgruppe Projektplanung - Abschlussbericht. Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt. Hannover, unveröffentlicht.



## **Fahrdynamikbasierte Entscheidungsmodelle zur mikroskopischen Simulation des Verkehrsflusses auf Binnenwasserstraßen**

Dipl.-Phys. Nicolas Fischer, Technische Universität Dresden

Dr. Martin Treiber, Technische Universität Dresden

Prof. Dr. Ostap Okhrin, Technische Universität Dresden

### **Einleitung**

Engstellen auf Wasserstraßen beeinflussen nicht nur einzelne Fahrzeuge, sondern können sich negativ auf den gesamten Verkehrsfluss auswirken. Dabei unterliegen die Schiffe fahrdynamischen Restriktionen, die ihrerseits die Handlungen der Schiffsführer und deren Entscheidungen zu sicheren Begegnungen und Überholungen beeinflussen. Zur Untersuchung der Auswirkung von Engstellen werden Modelle zu den fahrdynamischen Eigenschaften von Binnenschiffen und neu entwickelte Verhaltensmodelle der Schiffsführer zu dem hier vorgestellten mikroskopischen Verkehrsflussmodell vereint.

### **Modellbeschreibung**

Das hier vorgestellte Verkehrsflussmodell nutzt einen mikroskopischen, eindimensionalen, spurgebundenen Ansatz, bei dem jedes Schiff mit individuellen Attributen simuliert wird. Es baut auf dem bereits durch Fischer et al. (2014) und Fischer und Treiber (2015) beschriebenen Modell auf. Die Modellierung der Fahrdynamik nutzt querprofilbasierte Daten des Flusses, wie das Wassertiefen- und Strömungsgeschwindigkeitsprofil. Auf Basis dieser Daten kann zusammen mit den schiffsspezifischen Attributen nach Wassermann et al. (2010) der Widerstand und der von der eingesetzten Maschinenleistung  $P$  abhängige Schub bestimmt werden, welche zusammen eine Bewegungsgleichung für die Beschleunigung  $a(P)$  des Schiffes ergeben. Bei gesetzter Maschinenleistung kann diese integriert werden, um die neue Schiffsgeschwindigkeit und -position zu erhalten.

Zur Ermittlung von Engstellen wird die verfügbare Verkehrsfläche unter Berücksichtigung des aktuellen Tiefgangs und Squats mit der erforderlichen Verkehrsfläche verglichen. Diese erforderliche Verkehrsfläche kann, wie von Feierfeil (2015) vorgestellt, in Form verschiedener Zusatzbreiten bestimmt werden. Insbesondere sind dies die Zusatzbreiten in Kurvenfahrt nach Niesler (2012), in Querströmungsfeldern nach Söhngen et al. (2012) und im Bereich von Buhnen nach Söhngen und Feierfeil (2013). Außerdem werden Sicherheitsabstände zum Ufer und zu anderen Schiffen berücksichtigt. Die Zusatzbreiten sind geschwindigkeits- und damit maschinenleistungsabhängig und können zu Einschränkungen der vom Schiffsführer einsetzbaren Maschinenleistung führen.

Die Aufgabe im Rahmen der Verkehrssimulation ist es, diese vom Schiffsführer eingesetzte Maschinenleistung unter Berücksichtigung der verfügbaren Verkehrsfläche zu bestimmen. Außerdem muss auf Situationen wie Begegnungen oder Überholmanöver angemessen reagiert werden. Dabei wird von der Grundannahme ausgegangen, dass der Schiffsführer eine feste Wunschmaschinenleistung  $P_w$  einsetzt und von dieser nur in Ausnahmen abweicht. Im Rahmen der Modellentwicklung konnten einige dieser Ausnahmen identifiziert werden, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden.

## Freie Fahrt

Unter freier Fahrt wird hier die Fahrt ohne Interaktion mit anderen Schiffen verstanden. Es ist für den Schiffsführer jedoch erforderlich, die Maschinenleistung an äußere Bedingungen anzupassen. So kann z.B. eine Leistungsreduktion erforderlich sein, um an einer Tiefenengstelle den Squat zu verringern. Es werden harte und weiche Grenzen unterschieden. Harte Grenzen müssen auf jeden Fall eingehalten werden und sind für die sichere Fahrt des Schiffes unerlässlich. Weiche Grenzen können über- bzw. unterschritten werden, z.B. wenn die Einhaltung einer harten Grenze dies erfordert.

Die harte untere Grenze  $P_{\min}^h$  ist durch die modellbedingte Minimalgeschwindigkeit und die Minimalgeschwindigkeit aufgrund des Flächenbedarfs gegeben. Fährt ein Schiff langsamer als diese Geschwindigkeiten, kommt es zu einer Überschreitung der verfügbaren Verkehrsfläche, das Schiff läuft auf Grund oder berührt das Ufer. Die weiche untere Grenze  $P_{\min}^w$  ist gegeben durch die nach den jeweiligen Verkehrsregeln erforderliche Minimalgeschwindigkeit, eine Mindestwunschgeschwindigkeit, und eine Mindestgeschwindigkeit zur Einhaltung einer maximalen Zusatzbreite. Die Mindestwunschgeschwindigkeit stellt sicher, dass ein Schiff nicht an einer Stelle stehen bleibt, nur weil kurzzeitig ein erhöhter Leistungseinsatz erforderlich ist, um eine akzeptable Geschwindigkeit zu erreichen.

Die harte obere Grenze  $P_{\max}^h$  ist durch die Maximalgeschwindigkeit aufgrund des Flächenbedarfs, die Annäherung an die kritische Schiffsgeschwindigkeit und die installierte Maschinenleistung gegeben.

Durch die weiche obere Grenze  $P_{\max}^w$  werden die nach den jeweiligen Verkehrsregeln vorgeschriebene Maximalgeschwindigkeit sowie eine Maximalgeschwindigkeit zur Einhaltung einer maximalen Zusatzbreite berücksichtigt. Alle hier genannten Geschwindigkeiten können zur Bestimmung der zugehörigen Leistungsgrenze anhand der Bewegungsgleichung im stationären Fall ( $\dot{v} = 0$ ) in eine Maschinenleistung umgerechnet werden. Die Wahl der in der Simulation vom Schiffsführer eingesetzten Leistung erfolgt nach einer geschachtelten Regel:

$$P_{\text{frei}} = \max\left(P_{\min}^h, \min\left(P_{\max}^h, \max\left(P_{\min}^w, \min\left(P_{\max}^w, P_w\right)\right)\right)\right).$$

Dabei werden die Leistungsgrenzen in einem geschwindigkeitsabhängigen Vorausschaubereich ermittelt, die Leistungsanpassung erfolgt so vor dem Erreichen des leistungseinschränkenden Querprofils. Ein Beispiel für die Wahl der Maschinenleistung unter Berücksichtigung dieser Grenzen ist in Bild 1 gegeben.

## Folgefahrt und gebundener Richtungsverkehr

Werden nicht nur einzelne Schiffe, sondern auch weitere Schiffe in gleicher Fahrtrichtung betrachtet, ist es erforderlich das Modell zu erweitern, damit Sicherheitsabstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen eingehalten werden. Zu diesem Zweck wird hier eine abgewandelte Form des Intelligent Driver Models von Treiber et al. (2000) zur Berechnung der Beschleunigung verwendet:

$$a_{\text{IDM}} = a \left[ 1 - \left( \frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right], \text{ mit } s^*(v, \Delta v) = s_0 + \max\left(0, vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}}\right)$$

Nach diesem Modell wird die maximale Beschleunigung  $a$  erreicht, wenn der Abstand  $s$  zum vorausfahrenden Schiff sehr viel größer ist als ein Wunschabstand  $s^*$ . Dieser Wunschabstand setzt sich dabei aus einem Mindestabstand  $s_0$  und einem geschwindigkeitsabhängigen Anteil zusammen, der eine Folgezeit  $T$  und eine komfortable Verzögerung  $b$  berücksichtigt. Dabei wird auch die Annäherungsrate  $\Delta v$  zum Vorderfahrzeug einbezogen.

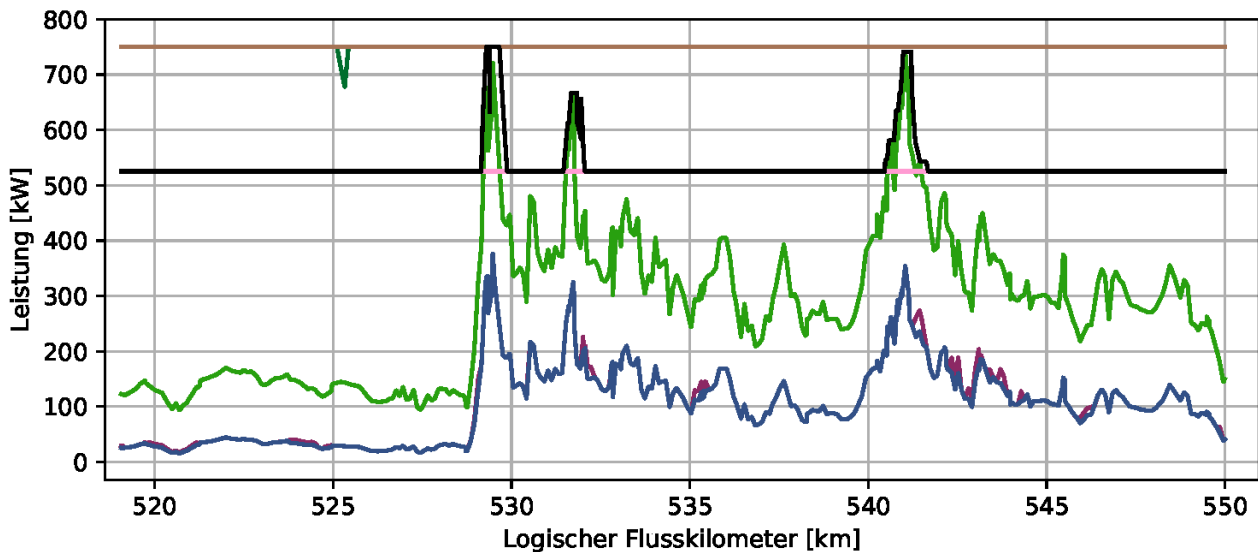


Bild 1: Leistungseinsatz bei Einzelfahrt eines voll abgeladenen Europaschiffes in der Bergfahrt auf dem Mittelrhein bei Mittelwasser. Die schwarze Linie entspricht der gewählten Leistung in der Simulation, die grüne Linie der erforderlichen Leistung zum Einhalten einer Mindestgeschwindigkeit von 1 m/s über Grund. Hier ist es in drei Flussabschnitten erforderlich die Wunschleistung zu überschreiten, um diese Geschwindigkeit nicht zu unterschreiten. Die übrigen Linien entsprechen den weiteren Ober- und Untergrenzen für die Maschinenleistung.

Die durch das IDM bestimmte Beschleunigung in Folgefahrt kann nun durch die Beschleunigung aus dem fahrdynamischen Modell begrenzt werden. Dazu werden zunächst die minimal erlaubte Beschleunigung  $a_{\min} = a(P_{\min}^h)$  und die Wunschbeschleunigung  $a_{\text{frei}} = a(P_{\text{frei}})$  bestimmt. Die Beschleunigung des Schiffes ergibt sich dann mittels  $a_{\text{Schiff}} = \max[a_{\min}, \min(a_{\text{frei}}, a_{\text{IDM}})]$ . Auf diesem Weg wird sichergestellt, dass die realisierte Beschleunigung im fahrdynamisch möglichen Bereich liegt und die verschiedenen Anforderungen an die Leistungsgrenzen erfüllt werden.

### Begegnungen und Überholmanöver

Im Rahmen von Begegnungen und Überholmanövern muss der Flächenbedarf für verschiedene Kombinationen von Schiffen ermittelt werden. Dabei wird zwischen dem agierenden Schiff, das seine Maschinenleistung anpassen muss und den übrigen beteiligten Schiffen, deren Maschinenleistung als konstant angenommen wird, unterschieden. Auf diesem Wege kann unter Berücksichtigung der einzelnen erforderlichen und verfügbaren Breiten und Sicherheitsabstände querprofilweise eine obere und untere Leistungsgrenze für das agierende Schiff bestimmt werden, mit der in der betrachteten Situation gefahren werden kann. Kann kein fahrbarer Leistungsbereich ermittelt werden, handelt es sich um eine Engstelle. Beispielhaft ist in Bild 2 der Fall einer Begegnung ohne Einschränkung gezeigt, während bei der Begegnung in Bild 3 Engstellen die möglichen Begegnungsbereiche einschränken.

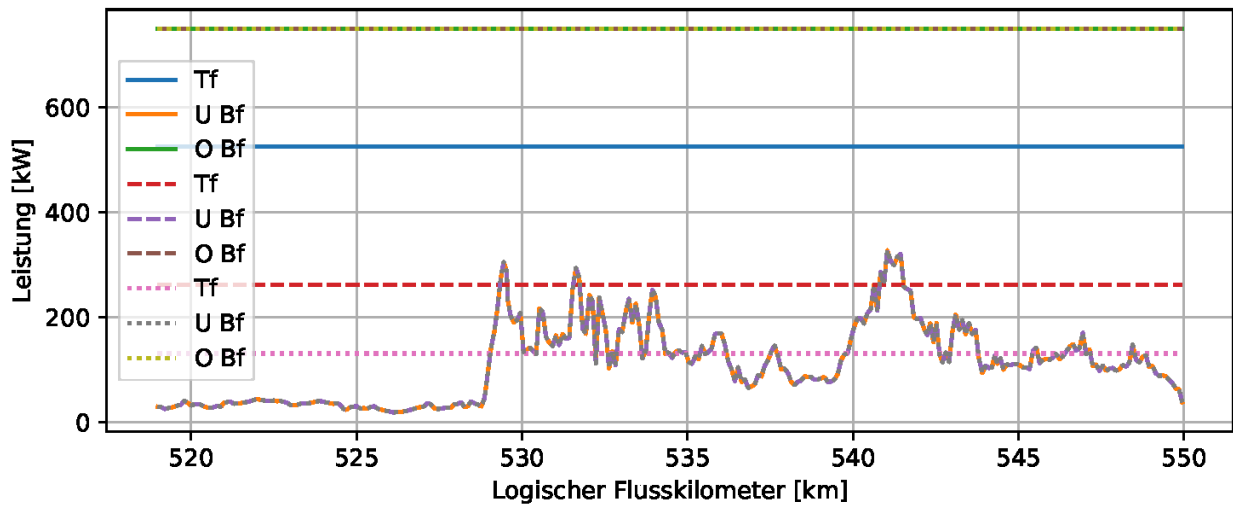


Bild 2: Obere (O Bf) und untere (U Bf) Grenze für die Maschinenleistung eines voll abgeladenen, bergfahrenden Europaschiffes bei Begegnung mit einem leer zu Tal fahrenden Europaschiff auf dem Mittelrhein bei Mittelwasser. Für das talfahrende Schiff (Tf) werden drei verschiedene Leistungen (durchgezogen, gestrichelt, gepunktet) und die dazugehörigen oberen und unteren Grenzen der für den Bergfahrer möglichen Maschinenleistungen über den Flussverlauf dargestellt. In diesem Fall ist eine Begegnung in allen Fällen möglich, die oberen und unteren Grenzen sind unabhängig von der Talfahrerleistung und liegen übereinander.

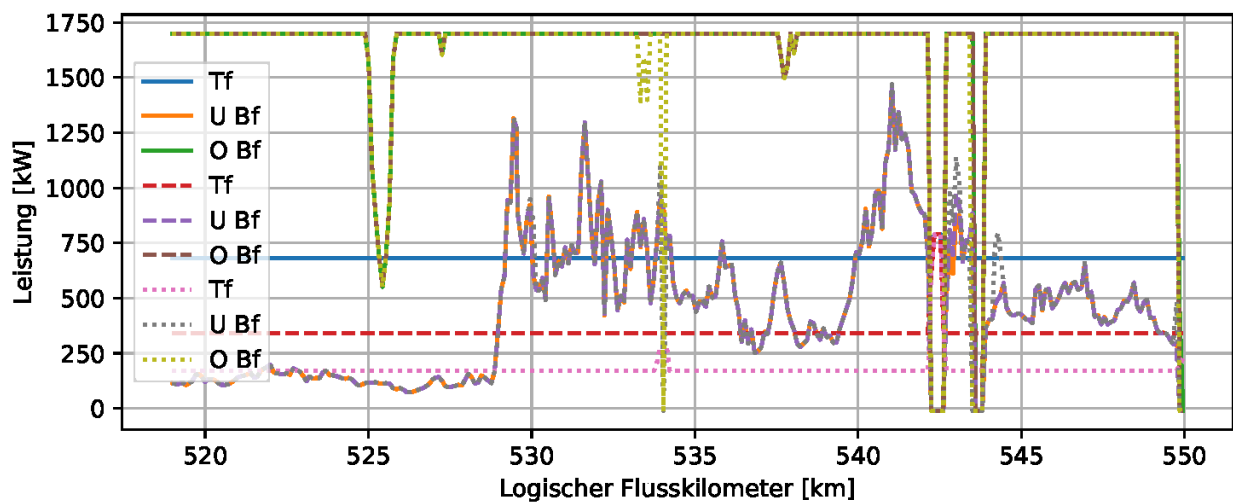


Bild 3: Obere (O Bf) und untere (U Bf) Grenze für die Maschinenleistung eines voll abgeladenen, bergfahrenden 4er-Koppelverbandes bei Begegnung mit einem leer zu Tal fahrenden 4er-Koppelverband auf dem Mittelrhein bei Mittelwasser. Für den talfahrenden Verband (Tf) werden drei verschiedene Leistungen (durchgezogen, gestrichelt, gepunktet) und die dazugehörigen oberen und unteren Grenzen der für den Bergfahrer möglichen Maschinenleistungen über den Flussverlauf dargestellt. In verschiedenen Bereichen konnte keine für den Bergfahrer fahrbare Leistung ermittelt werden, es handelt sich um Engstellen. So liegen im Bereich zwischen km 540 und 545 zwei enge Kurven, in denen die Begegnung nicht möglich ist. Eine weitere Engstelle im Bereich um km 534 (ebenfalls eine Kurve) entsteht erst, wenn der Talfahrer mit einer sehr niedrigen Leistung fährt.



Im Falle einer Begegnung kann der Bergfahrer den Begegnungsbereich durch Änderung der gewünschten Maschinenleistung  $P_w$  verlagern. Insbesondere kann er vor einer Engstelle warten und die Maschinenleistung in der Warteposition im gleichen Zuge so wählen, dass die Begegnung an diesem Ort möglich ist. Für Überholmanöver lässt sich überprüfen, ob innerhalb der Überholstrecke Engstellen vorliegen und der Wunsch des Schiffsführers ein vorausfahrendes Fahrzeug zu überholen ggf. unterbinden.

### Beispielszenario einer Begegnung

Als Beispiel wird erneut die Begegnung zweier 4er-Koppelverbände herangezogen. Die Anfangspositionen der beiden Schiffe sind so gewählt, dass die Begegnung in der flussaufwärtigen Engstelle zwischen km 540 und 545 erfolgt. Der Bergfahrer reduziert in der Simulation jedoch die Maschinenleistung, um vor der Engstelle zu warten und die Begegnung zwischen die beiden Engstelle zu legen (s. Bild 4).

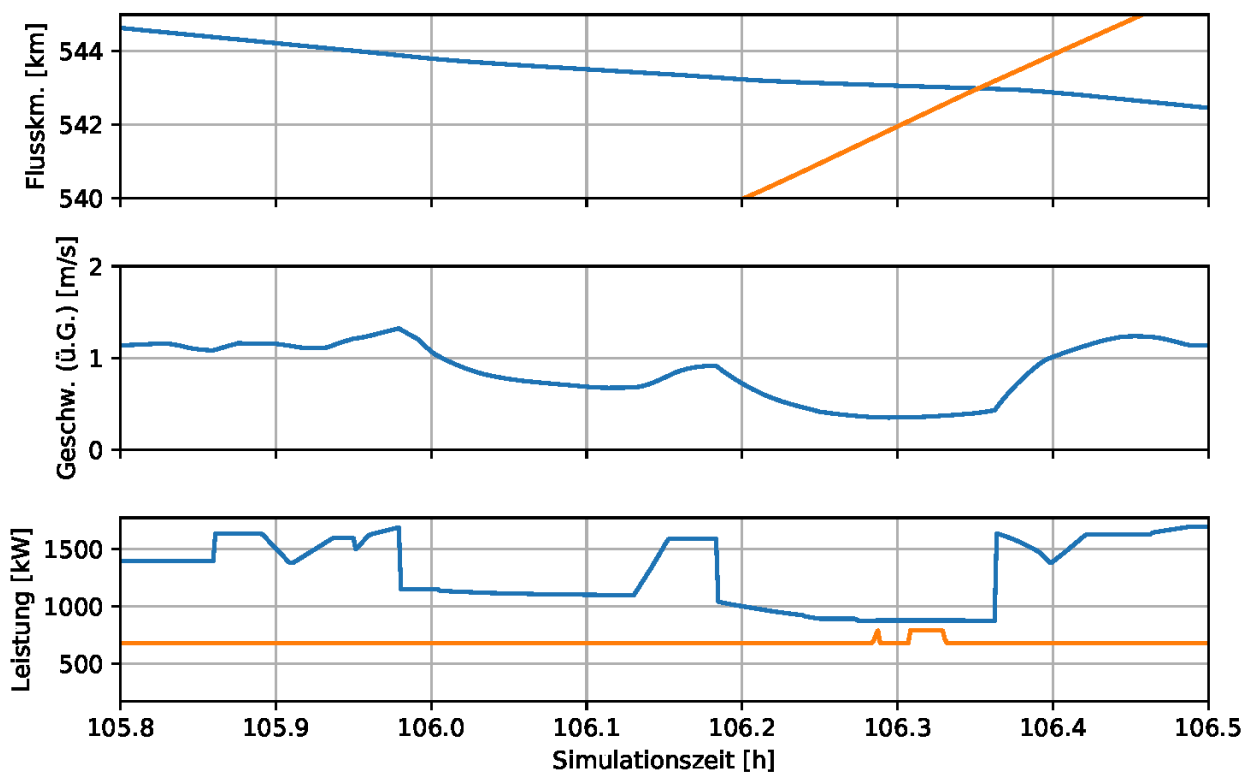


Bild 4: Simulation der Begegnung zweier 4er-Koppelverbände im Bereich der beiden Engstellen zwischen km 540 und 545. Der Bergfahrer (blau) reduziert vor der Begegnung die Leistung und damit die Geschwindigkeit, um zwischen den Engstellen zu warten und den Talfahrer (orange) passieren zu lassen. Die zwischenzeitliche Leistungserhöhung vor Simulationszeit 106.2 ist durch die erste Engstelle bedingt, die der Bergfahrer nur mit einer höheren Geschwindigkeit durchfahren kann.

## Zusammenfassung

Bei der mikroskopischen Simulation des Schiffsverkehrs ist es wichtig, die starke Abhängigkeit der Fahrdynamik des einzelnen Schiffes von seiner Umgebung zu berücksichtigen. In diesem Beitrag haben wir eine Vorgehensweise dargestellt, die auf Basis der Maschinenleistung eine Anpassung des Schiffsführerverhaltens an die äußeren Gegebenheiten ermöglicht. Darüber hinaus lässt sich dieses Vorgehen auf ein Verhaltensmodell für Begegnungen und Überholmanöver übertragen.

## Literatur

- Feierfeil, T. (2015): Ermittlung notwendiger Fahrrinnenbreiten auf Basis von Naturmessungen. In Tagungsband Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße mit Auswirkungen auf Nautik und schiffsinduzierte Belastungen, S. 45-51.
- Fischer, N., Treiber, M. (2015): Mikrosimulation des Schiffsverkehrs am Beispiel des Rheins. In Tagungsband Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße mit Auswirkungen auf Nautik und schiffsinduzierte Belastungen, S. 63-70.
- Fischer, N., Treiber, M., Söhngen, B. (2014): Modeling and Simulating Traffic Flow on Inland Waterways. In Proceedings of the XXXIIIth PIANC World Congress, San Francisco.
- Niesler, H. (2012): Bericht zu den Untersuchungen zum cf-Wert. Bericht des Ingenieurbüros Schmid, Kapsweyer.
- Söhngen, B., Feierfeil, T. (2013): Ermittlung notwendiger Sicherheitsabstände von Binnenschiffen zu Buhnen aus Modellversuchen und Simulationsergebnissen. Bericht der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
- Söhngen, B., Maedel N., Hahne, L. Verdugo, I., Iribarren, J. (2012): Additional navigational widths of inland vessels passing cross current fields. PIANC On Course, January 2012.
- Treiber, M., Hennecke, A., Helbing, D. (2000): Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations. Phys. Rev. E, Volume 62, Issue 2, S. 1805-1824.
- Wassermann S., Söhngen B., Dettmann, T., Heinzelmann, C. (2010): Investigations to define minimum fairway widths for inland navigation channels. In PIANC World Congress, Liverpool.

## **Verfahrensentwicklung für die numerische Langfristsimulation im Flussbau**

Dr.-Ing. Leopold Stadler, Bundesanstalt für Wasserbau

Dr.-Ing. Thomas Brudy-Zippelius, Bundesanstalt für Wasserbau

### **Einleitung**

Zukunftsprognosen auf Grundlage von Modellen sind ein wichtiges Werkzeug der Ingenieurpraxis, um die Auswirkungen von Veränderungen an bestehenden Systemen abschätzen zu können. Im Flussbau gehören z. B. der Bau und die Dimensionierung von Buhnen und Leitwerken zu typischen Aufgaben deren Auswirkungen auf das verkehrswasserbauliche System mit gegenständlichen oder numerischen Modellen untersucht werden müssen. Mehrdimensionale hydrodynamisch-numerische Modelle (HN-Modelle) werden seit langem in Kombination mit morphodynamischen Modellen eingesetzt, um die Auswirkungen von Maßnahmen auf den Sedimenttransport an Binnenschiffahrtsstraßen zu untersuchen. Numerische Simulationen über sehr lange Zeiträume (numerische Langfristsimulationen) stellen jedoch weiterhin eine Herausforderung für die Ingenieurpraxis dar. Zentrales Problem ist, dass die zukünftigen hydraulischen Randbedingungen unbekannt sind und daher im Vorfeld künstlich generiert werden müssen. Um die Belastbarkeit der Aussagen zu erhöhen, müssen die Modelle mit vielen unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt werden und die Ergebnisgrößen über statistische Größen und Methoden (z. B. Bandbreiten, Trends oder Wahrscheinlichkeiten) beschrieben werden. Für ein solches Vorgehen sind performante numerische Verfahren notwendig, die es erlauben viele Rechenläufe effizient durchzuführen. Um dieses Ziel zu erreichen, arbeitet die BAW in einem aktuellen FuE-Projekt an der Entwicklung geeigneter numerischer Verfahren.

### **Grundlagen der Langfristsimulation**

Die Aussagefähigkeit dieser meist zweidimensionalen numerischen Verfahren ist durch die recht einfachen zugrunde liegenden Transportmodelle, ihrem stark empirischen Charakter und der komplexen Parametrisierung beschränkt. Für zweidimensionale Modelle müssen zudem dreidimensionale Effekte (Sekundärströmung) über weitere empirische Ansätze parametrisiert werden, um den Einfluss von Krümmungen auf den Geschiebetransport abzubilden. Eine weitere Herausforderung für die Modellierung des Sedimenttransports ist die lückenhafte Datengrundlage, denn die Kornzusammensetzung des Untergrunds ist in der Regel nur an wenigen Messpunkten bekannt und unterliegt einer starken natürlichen Variabilität. Somit müssen die Daten entsprechend räumlich und zeitlich aufbereitet werden, um eine geeignete Anfangsbedingung für das numerische Modell zu erzeugen.

Aus den vorangegangenen Punkten resultiert, dass mit numerischen Modellen keine lokalen punktgenauen Aussagen der Sohlentwicklung über die Zeit möglich sind. Aus den Ergebnissen des numerischen Modells lässt sich jedoch beispielsweise eine räumlich gemittelte Sohlentwicklung ableiten, mit der der Einfluss von Maßnahmen in einem Untersuchungsbereich quantifiziert werden kann (Bild 1). So kann mit Hilfe der numerischen Langfristsimulation z. B. der langfristige Trend der Sohlentwicklung in einem Untersuchungsbereich erfasst werden. Durch diese Möglichkeit sind numerische Modelle ein wichtiges Werkzeug in der Ingenieurpraxis geworden.

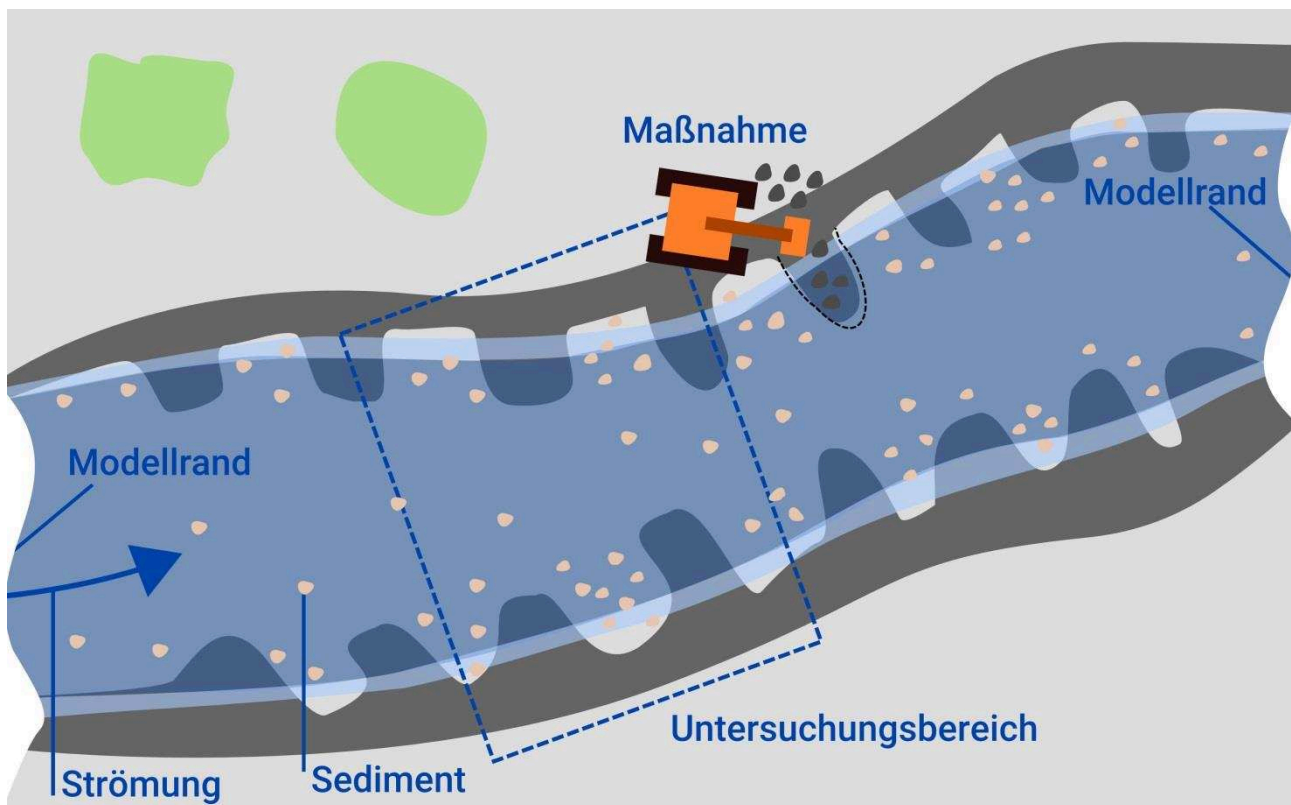
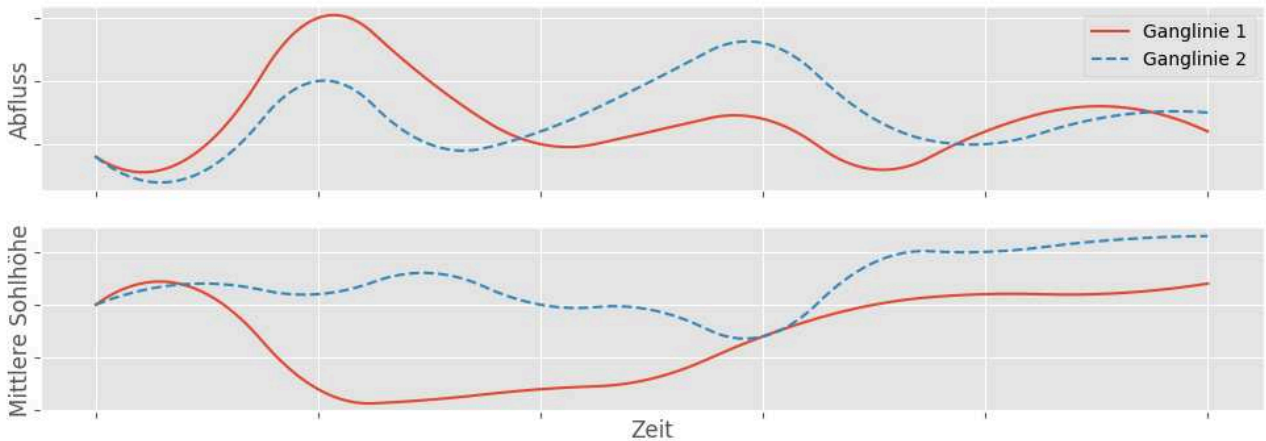


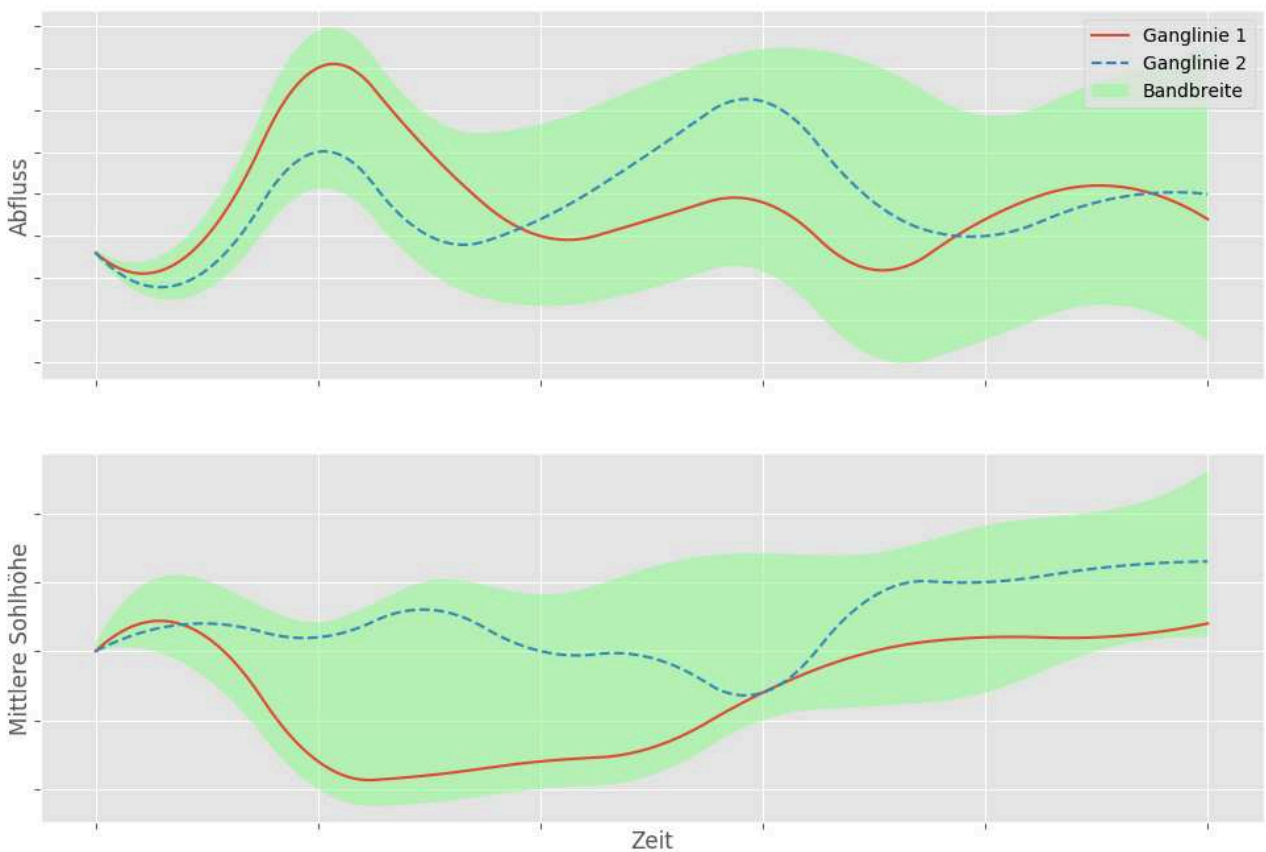
Bild 1: Vereinfachte Darstellung eines Flusses inklusive Regelungsmaßnahme.

An dieser Stelle soll nicht grundsätzlich über die Qualität und Aussagefähigkeit der numerischen Modellierung diskutiert werden, vielmehr soll ein wichtiger Aspekt betrachtet werden, der nur allzu schnell außer Acht gelassen wird: Ein entscheidendes Problem bei der Prognose ist die Unsicherheit in den maßgeblichen treibenden Kräften eines Systems, den Randbedingungen. Für das HN-Modell müssen in der Regel die Abflüsse (oberstrom) und die Wasserstände (unterstrom) vorgegeben werden. Für das morphodynamische Modell muss der Sedimenteintrag bzw. -austrag quantifiziert werden. Für die Anwendung in der Ingenieurpraxis ist unklar, wie sich die Randbedingungen in den nächsten Jahren entwickeln werden. Es lassen sich jedoch zukünftige hydrologische Ganglinien, z. B. für Pegelinzugsgebiete, synthetisch erzeugen. Aus dieser Vorgehensweise resultiert keine eindeutige Ganglinie für die Zukunft, sondern eine Vielzahl möglicher Realisationen. Im laufenden FuE-Projekt sollen die Auswirkungen dieser Vorgehensweise auf die Modellaussagen untersucht werden. Das Problem der künstlichen Ganglinien lässt sich an einem einfachen Beispiel konkretisieren. Bild 2 zeigt zwei künstlich generierte Abflusskurven für einen Betrachtungszeitraum an einem Flussabschnitt (Bild 1). Wenn mit beiden Randbedingungen jeweils eine Simulation durchgeführt wird und die Ergebnisse, hier die mittleren Sohlhöhen im Untersuchungsbereich, verglichen werden, führen die verschiedenen Randbedingungen zu unterschiedlichen Ergebnissen (Bild 2). Geht man davon aus, dass beide Ganglinien mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auftreten, so sind beide Aussagen über die Entwicklung der mittleren Sohlhöhe gleich wahrscheinlich.



**Bild 2:** Vereinfachte Darstellung von zwei künstlich generierten Ganglinien und deren Auswirkung auf die mittlere Sohlhöhe im betrachteten Untersuchungsbereich.

Nach Durchführung von Rechnungen mit einer Vielzahl an synthetisch generierten Ganglinien resultiert als Ergebnis eine Bandbreite möglicher Resultate (Bild 3). Dabei können die Ergebnisse für eine Prognose mit unterschiedlichen statistischen Methoden ausgewertet werden.



**Bild 3:** Vereinfachte Darstellung mehrerer künstlich generierter Ganglinien und die daraus resultierende Bandbreite für die Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im betrachteten Untersuchungsbereich.

## Aktueller Stand der Verfahrensentwicklung

Das zuvor dargestellte Konzept der Langfristsimulation klingt zunächst einfach. Wenn wir wissen wollen, wie sich die Gewässersohle in einem Streckenabschnitt in den nächsten Jahrzehnten entwickeln wird, müssen wir anstelle einer einzelnen Rechnung mit einer bestimmten Ganglinie (im Folgenden Szenario genannt) möglichst viele Rechnungen (Szenarien) mit unterschiedlichen synthetischen Ganglinien berechnen. Durch das Ausführen mehrerer Simulationen erzeugen wir unterschiedliche Ergebnisse, durch Aggregation erhält man bei der Auswertung eine Bandbreite.

Um anstelle einer einzelnen Rechnung dutzende von Rechnungen durchzuführen zu können, muss die eingesetzte Simulationssoftware jedoch extrem performant sein. Aus diesem Grund wird aktuell an einem neuen numerischen Verfahren gearbeitet, bei dem durch eine deutliche Steigerung der Zeitschrittweiten im Vergleich zu bisherigen Methoden die Simulationszeit verkürzt wird. Betrachtet man die physikalischen Zeitskalen, so hängt die mögliche Zeitschrittweite von HN-Modellen vereinfacht ausgedrückt von der Geschwindigkeit der Informationsausbreitung ab (Strömungsgeschwindigkeit und Wellengeschwindigkeit). Da sich das mittlere Strömungsfeld in Flüssen jedoch zeitlich nur langsam ändert, besteht hier großes Potential die bisherigen Zeitschrittweiten deutlich zu vergrößern, ohne nennenswerte Einbußen in der Genauigkeit hinnehmen zu müssen.

Erste Studien mit dem an der BAW entwickelten Verfahren Dune-SWF (**S**hallow **W**ater **F**lows) haben diese Annahme für die HN-Modellierung bestätigt. Dune-SWF basiert auf der Tool-Box Dune (Blatt et. al, 2016) und dem Dune-Modul PDELab (Bastian et. al, 2010). Die Abkürzung Dune steht für Distributed and Unified Numerics Environment. Für die Untersuchung wurde an zwei Streckenabschnitten ein Vergleich mit Naturdaten und anderen numerischen Verfahren durchgeführt. Dabei zeigte sich in den Ergebnissen für Dune-SWF sogar eine deutlich geringe Abhängigkeit von der gewählten Zeitschrittweite als bei anderen numerischen Verfahren. Nur im Bereich der Überflutungsflächen im Vorland kam es zu kleineren Abweichungen. In der Modellierung von Flüssen können für die Langfristsimulation also deutlich größere Zeitschritte als bisher üblich verwendet werden.

Durch die Verwendung von Dune konnte die Entwicklungszeit deutlich reduziert werden. So beinhaltet der Kern von Dune zum Beispiel bereits die notwendige Parallelisierung für den Einsatz auf Großrechnern. Durch eine automatische Gebietszerlegung kann das ursprüngliche Rechengebiet in einzelne Teilgebiete zerlegt werden. Für große Systeme wurde bereits mit einer Zerlegung in mehr als 2400 Teilgebiete gerechnet. Das bedeutet, dass mehr als 2400 Rechenkern zur Lösung des Problems verwendet wurden. Bild 4 zeigt den Speedup, der durch die Verwendung von mehr als einem Rechenkern für ein HN-Modell der Donau mit ca. 2.6 Mio. Elementen erzielt wird. Im Vergleich zum idealen linearen Verlauf (schwarz eingezeichnet), zeigt die Grafik, dass bis zu einer Anzahl von ca. 1400 Rechenkernen eine sehr gute Skalierung erreicht wird. Durch den Einsatz auf den BAW-Hochleistungsrechnern können zudem mehrere Rechnungen (Szenarien) unabhängig voneinander parallel berechnet werden. Die tatsächlichen Rechenzeiten hängen von der gewählten Gitterauflösung und der Abflusssituation ab. Aktuell kann Dune-SWF um bis zu Faktor 1000 schneller als die Realzeit rechnen. Durch die Weiterentwicklung von Dune-SWF sollen die Rechenzeiten noch weiter verkürzt werden.



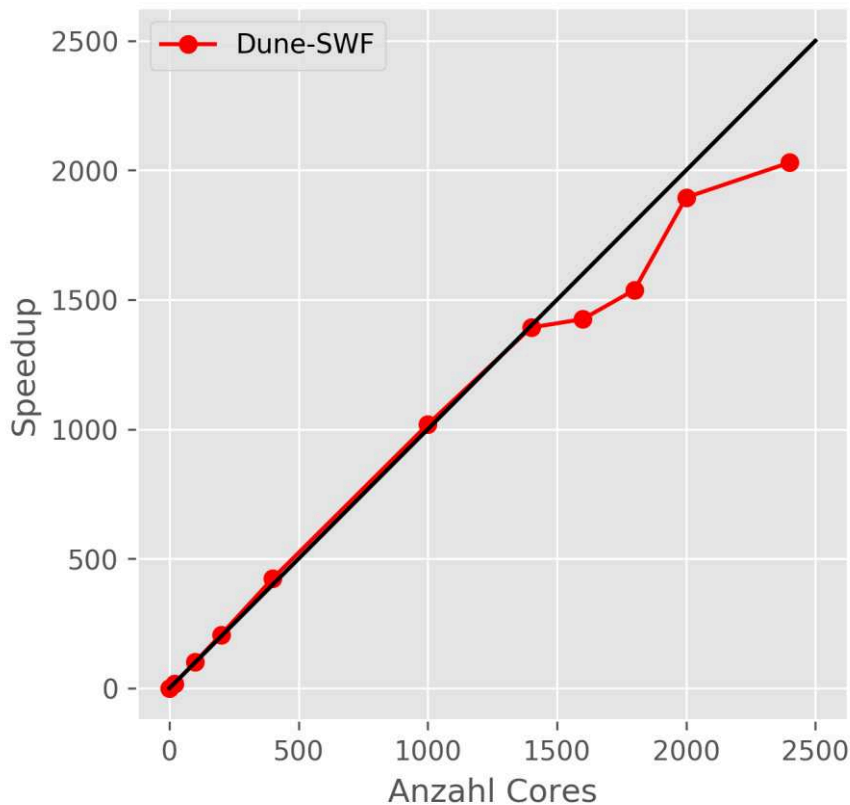


Bild 4: Speedup von Dune-SWF für ein HN-Modell der Donau mit ca. 2,6 Mio. Elementen. In schwarz hinterlegt, der ideale lineare Verlauf.

### Ausblick

Nach den vielversprechenden Ergebnissen von Dune-SWF in der HN-Modellierung wird die Software im nächsten Schritt um ein Modul für die Modellierung des Sedimenttransports erweitert. Im Rahmen dieser Arbeiten soll unter anderem untersucht werden, wie stark die resultierenden Bandbreiten von den eingesetzten Transportansätzen für die morphodynamische Modellierung abhängen. Es wird angestrebt durch möglichst einfache und robuste Ansätze die Rechenzeiten für die Langfristsimulation zu optimieren.

### Literatur

- Bastian, P., Heimann, F., Marnach, S. (2010): Generic implementation of finite element methods in the Distributed and Unified Numerics Environment (DUNE). *Kybernetika*, Volume 46, Number 96, S. 294-315.
- Blatt, M., Burchardt, A., Dedner, A., Engwer, C., Fahlke, J., Flemisch, B., Gersbacher, C., Gräser, C., Gruber, F., Grüninger, C., Kempf, D., Klöfkorn, R., Malkmus, T., Müthing, S., Nolte, M., Piatkowski, M., Sander, O. (2016): The Distributed and Unified Numerics Environment, Version 2.4. *Archive of Numerical Software*, Volume 4, Number 100, S. 13 – 29.
- Kellermann, J. (2014): Einfluss von hydrologischen Ganglinien auf Berechnungsergebnisse eines ein-dimensionalen Feststofftransportmodells an der Donau zwischen Straubing und Hofkirchen. In *Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen* Nr. 50, 2014, S. 217-227.



## **Geschiebetransport im gegenständlichen Modell: Neue Ansätze zur naturähnlichen Abbildung komplexer morphodynamischer Prozesse**

Prof. Dr.-Ing. Bernd Ettmer, Hochschule Magdeburg-Stendal

Dipl.-Ing. Bernd Hentschel, Bundesanstalt für Wasserbau

Stefan Orlik M. Eng., Hochschule Magdeburg

### **Einleitung**

Hydraulisch-sedimentologische Prozesse in Fließgewässern sind nach wie vor nur mit erheblichen Unsicherheiten zu quantifizieren. Um die maßgeblichen hydraulisch-sedimentologischen Prozesse in der Natur nachvollziehen zu können, wird im Wasserbau häufig ein physikalisches Modell verwendet. Die komplexe Interaktion zwischen Strömung und Sediment wird im physikalischen Modell in einem verkleinerten Maßstab abgebildet und erfordert somit auch eine Skalierung des Sohlenmaterials. Liegt das Sohlenmaterial in der Natur zudem in Form einer weitgestuften Sieblinie vor und enthält es maßgebliche Feinanteile, ist eine rein geometrische Skalierung des Sohlenmaterials im Allgemeinen nicht möglich. Stattdessen wird auf Kunststoffgranulat als Ersatzmaterial für die bewegliche Sohle im Modell zurückgegriffen. Wesentliche Fragestellungen zur Auswahl der Kunststoffgranulate sowie zur Anwendbarkeit von Übertragungskriterien zwischen Natur und Modell sind nicht abschließend geklärt und erfordern zahlreiche Vorversuche und umfangreiche Erfahrung, u.a. Yalin (1971), Dorer (1984), Hughes (1993), Ettmer (2006), Hentschel (2007).

Um die Fragen der Ähnlichkeit morphologischer Prozesse zwischen Natur und Modell eingehender verstehen zu können, wurde zwischen der Hochschule Magdeburg-Stendal und der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe (BAW) eine Kooperationsvereinbarung geschlossen, um grundsätzliche Fragen zur Übertragung von Sohlenmaterialien aus der Natur in Sohlenmaterialien für experimentelle Laborversuche zu untersuchen. Die experimentellen Laborversuche umfassten umfangreiche Untersuchungen zur Nachbildung von Sieblinien aus Kunststoffgranulaten. Dabei wurde der Einfluss des Korndurchmessers, der Dichte, der Kornform, der Ungleichförmigkeit der Sieblinie sowie ein mögliches Verklumpungs- und Entmischungsverhalten verschiedener Kunststoffgranulate untersucht. Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss der einzelnen Parameter auf grundlegende hydraulisch-sedimentologische Prozesse zu identifizieren. Zudem wurden verschiedene Kunststoffgranulatmischungen für die Verwendung als Modellsediment in physikalischen Modellen untersucht. Um einen qualifizierten Vergleich zur Natur herzustellen, wurden Vergleichsuntersuchungen mit Sandmischungen durchgeführt.

Es werden nachfolgend erste Ergebnisse dieser Untersuchungen für den Geschiebetransport präsentiert. Grundsätzlich wurde so vorgegangen, dass in einer hydraulischen Rinne mit Geschiebekreislauf zunächst Referenzversuche mit Sand durchgeführt wurden, um mit einem geeigneten Kunststoffgranulat die in den Sandversuchen beobachteten morphodynamischen Prozesse und Sohlenformen, ausgehend von Ähnlichkeitstheoretischen Ansätzen, nachzubilden.

## Auswahl geeigneter Modellsedimente

Die Auswahl geeigneter Modellsedimente erfolgte nach zwei Ähnlichkeitskriterien.

### 1. Ähnlichkeitskriterium

$$D^*- \text{ Kriterium: } D_r^* = \frac{D_N^*}{D_M^*} = \frac{\left(\frac{\rho'_N \cdot g}{\nu^2}\right)^{1/3} \cdot d_N}{\left(\frac{\rho'_M \cdot g}{\nu^2}\right)^{1/3} \cdot d_M} = \frac{\rho'_N{}^{1/3} \cdot d_N}{\rho'_M{}^{1/3} \cdot d_M} = \rho_r'^{1/3} \cdot d_r = 1 \quad (\text{Gl. 1})$$

mit

- $D^*$  = sedimentologischer Korndurchmesser [-],
- $\rho'$  = relative Dichte des Sedimentkorns [-],
- $g$  = Erdbeschleunigung in  $\text{m/s}^2$ ,
- $\nu$  = kinematische Viskosität des Fluids  $\text{m}^2/\text{s}$ ,
- $d$  = Korndurchmesser in  $\text{m}$ ,
- Index  $r$  = Relation zwischen Natur und Modell,
- Index  $N$  = Naturwert (hier: Referenzversuch mit Sand),
- Index  $M$  = Modellwert (hier: Versuch mit Kunststoffgranulat)

Nach Gl. 1 weisen ein Sand und ein Kunststoffgranulat einen identischen sedimentologischen Korndurchmesser auf, wenn das Verhältnis der Korndurchmesser  $d_N/d_M = d_r$  dem Verhältnis der spezifischen Dichten  $\rho_r'^{1/3}$  entspricht.

Als zweites Ähnlichkeitskriterium wurde die kornbezogene Widerstandszahl  $X_g$  angewandt, Ettmer (2006), vgl. Gl. 2. Mit dem  $X_g$ -Kriterium wurde die Relation der Fließgeschwindigkeiten  $v_r$  zwischen den Sandversuchen (Naturwert) und den Versuchen mit Kunststoffgranulat (Modellwert) abgeleitet.

### 2. Ähnlichkeitskriterium

$$X_g\text{-Kriterium: } X_{g,r} = \frac{X_{g,N}}{X_{g,M}} = \frac{\left(\frac{\rho'_N \cdot g \cdot d_N^2}{\nu_N \cdot \nu}\right)}{\left(\frac{\rho'_M \cdot g \cdot d_M^2}{\nu_M \cdot \nu}\right)} = \frac{\rho'_N \cdot d_N^2 \cdot \nu_N^{-1}}{\rho'_M \cdot d_M^2 \cdot \nu_M^{-1}} = \rho_r' \cdot d_r^2 \cdot \nu_r^{-1} = 1 \quad (\text{Gl. 2})$$

Aus dem zweiten Auswahlkriterium wurde über die Relation  $\nu_r = \rho_r' \cdot d_r^2 = \nu_N/\nu_M$  die maßgebliche mittlere Fließgeschwindigkeit für die experimentellen Untersuchungen abgeleitet.

Für die experimentellen Untersuchungen wurden 1 Sand und 6 Kunststoffgranulate ausgewählt, vgl. Tabelle 1. Ausgehend davon, dass mit dem sedimentologischen Durchmesser  $D^*$  alle wesentlichen Materialkenngrößen in einer Kennzahl erfasst sind, wurde eine Sandsieblinie für charakteristische Korndurchmesser in den sedimentologischen Durchmesser  $D^*$  umgerechnet. Eine hierzu passende Sieblinie aus Kunststoffgranulaten wurde für die  $D^*$ -Werte der Sandsieblinie mit  $D^*_{\text{Sand}} = D^*_{\text{Kunststoffgranulat}}$  zusammengemischt. Da Kunststoffgranulate zumeist als Einkornmaterialien vorliegen, erfolgte die Zusammenstellung der Sieblinie aus Kunststoffgranulaten mit entsprechenden Einzelkornfraktionen,

(vgl. Bild 1). Fotografien des verwendeten Modellsandes und der Kunststoffgranulate sind in Bild 2 und Bild 3 dargestellt.

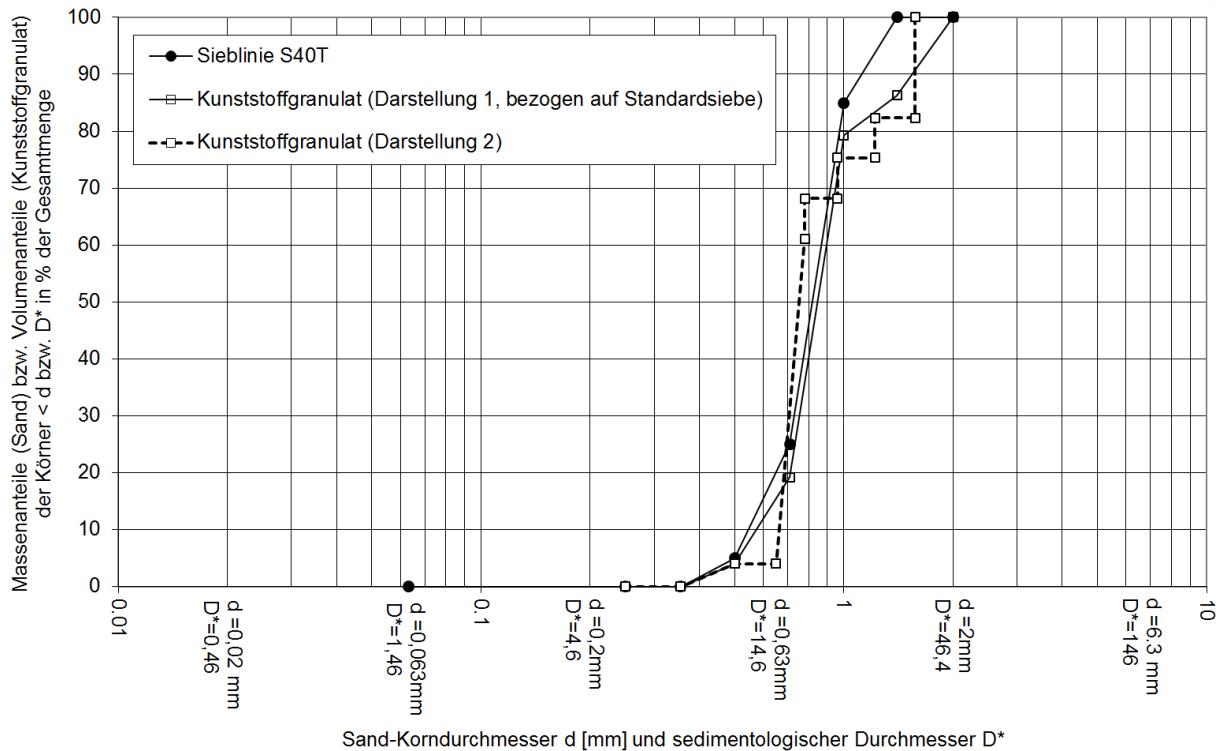


Bild 1: Beispiele für Sieblinien des verwendeten Modellsandes sowie der Kunststoffgranulate.

Tabelle 1: Kennzahlen der verwendeten Sande und Kunststoffgranulate.

Bezeichnung	d <sub>50</sub> [mm ]	Siebli- nie [mm]	U d <sub>60</sub> /d <sub>10</sub>	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Kornform	D* <sub>50</sub> <sup>(3)</sup>	D*-Sieblinie
Sand S30T	0,43	0,2-0,8	1,84	2650	gerundet	rd.10	rd. 5-19
Sand S40T <sup>(1)</sup>	0,82	0,4-1,4	1,60	2650	gerundet	rd. 19	rd. 9-33
Polystyrol weiß	0,75	0,60- 0,90	rd. 1.2	1035	Kugel	rd. 6	rd. 4-7
Polystyrol gelb <sup>(2)</sup>	2,06	1,56- 2,87	1,19	1058	Zylinder	rd. 15	rd. 12-22
Granulat blau	2,5	Einkorn	1	1050	Quader	rd. 18	rd. 18
Granulat schwarz	2,3	Einkorn	1	1120	Ellipse	rd. 22	rd. 22
Novodur gelb	3,5	Einkorn	1	1070	Quader	rd. 28	rd. 28
Acetalharz	2,6	Einkorn	1	1365	Ellipse	rd. 36	rd. 36

(1) gewaschener und gesiebter Sand der Fa. Schlingmeier, Braunschweig, Angaben aus Datenblatt zum Sand

(2) Das Kunststoffgranulat Polystyrol wurde von der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe zur Verfügung gestellt. Es entstammt dem Odermodell

(3) Die kinematische Viskosität wurde mit  $\nu = 1,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  angesetzt.



Bild 2: Sand S40T,  $D^*_{50} = \text{rd. } 19$ ,  $d_{50} = 0,82 \text{ mm}$



Bild 3: Polystyrol weiß,  $D^* = \text{rd. } 6$  (oben links), Polystyrol gelb,  $D^*_{50} = \text{rd. } 15$  (oben mitte), Granulat blau,  $D^* = \text{rd. } 18$  (oben rechts), Granulat schwarz,  $D^* = \text{rd. } 22$  (unten links), Novodur gelb,  $D^* = \text{rd. } 28$  (unten Mitte), Acetalharz,  $D^* = \text{rd. } 36$  (unten rechts).

## Ergebnisse

Die experimentellen Untersuchungen zeigten, dass eine grundsätzliche Nachbildung der Sandsieblinie durch Kunststoffgranulate erfolgen konnte. Hierzu wurden die Einzelfractionen der Kunststoffgranulate nach der oben beschriebenen Vorgehensweise gemischt. In einer hydraulischen Versuchsrinne mit Geschiebekreislauf wurden stationäre experimentelle Untersuchungen zum Geschiebetransport durchgeführt, (vgl. Bild 4).





*Bild 4:      Hydraulische Versuchsrinne mit Kunststoffgranulat-Einzelfraktionen (links) und eingemischten Einzelfraktionen (rechts).*

In den experimentellen Untersuchungen zeigte sich, dass die Mischung der verschiedenen Kunststoffgranulate als sohlennahes Geschiebe transportiert wurde und Transportkörper im Wesentlichen in Form von Dünen vorlagen. Die Einzelfraktionen mischten sich an der Dünenfront in den Transportkörper ein. Grundsätzlich erfolgte eine gut verteilte Einmischung der Einzelfraktionen in den Transportkörper, (vgl. Bild 5):



*Bild 5:      Transportkörper aus einer Kunststoffgranulatsieblinie.*

Die experimentellen Untersuchungen zeigten zudem, dass mit der Kunststoffgranulatmischung eine grundsätzlich ähnliche Transportkörpergeometrie und ein grundsätzlich ähnlicher Geschiebetransport erzielt werden konnte wie im Referenzversuch mit Laborsand, (vgl. Bild 6).

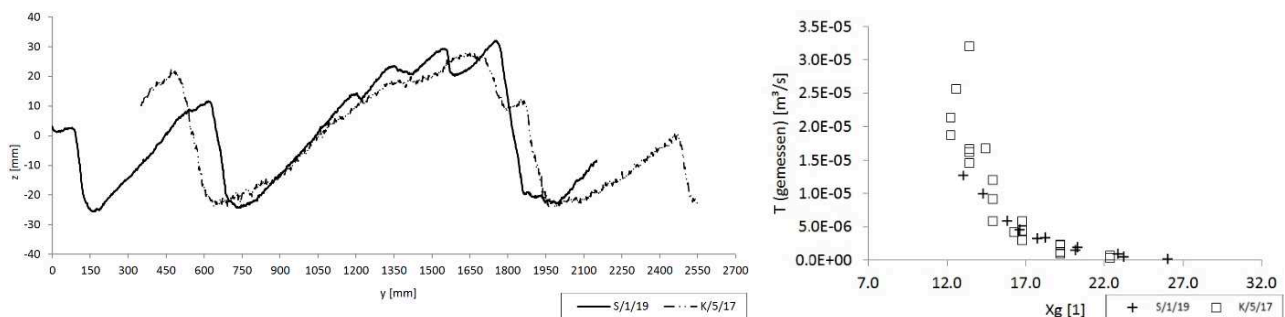


Bild 6: Sand und Kunststoffgranulatmischung, Längsschnitt durch mehrere Transportkörper, (links) und Geschiebetransportmessung (rechts).

### Kurzzusammenfassung

Die experimentellen Untersuchungen zur Nachbildung von Sandsieblinien aus Kunststoffgranulaten haben gezeigt, dass grundsätzlich ähnliche geometrische Sohlenformen erzielt werden konnten, wenn die dimensionslosen Kennzahlen  $D^*$  und  $X_g$  für den Sandversuch als Referenzversuch und den Kunststoffgranulatversuch konstant gehalten wurden. Ergebnisse zum Geschiebetransport zeigten, dass die Ähnlichkeit der zeitlich abhängigen Prozesse sehr gut erfasst werden konnte. Weitere Ergebnisse werden in fortführenden Veröffentlichungen präsentiert.

### Literatur

- Dorer, H., (1984): „Ähnlichkeit bei flussbaulichen Modellen“, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 54, Karlsruhe, Februar 1984, ISSN 0572-5801.
- Ettmer, B., (2006): "Untersuchungen zu Kolkvorgängen hinter dem unterströmten Schütz", Mitteilungen Heft 155/2006, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, ISSN 0343-1223.
- Hentschel, B., (2007), "Hydraulische Flussmodelle mit beweglicher Sohle", Mitteilungsblatt Heft 90 "Wasserbauliches Versuchswesen", Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
- Hughes, S. A., (1993): "Physical models and laboratory techniques in coastal engineering", World Scientific Publishing, ISBN 978-981-02-1541-5.
- Yalin, M.S., (1971): "Theory of hydraulic models", Macmillian Civil Engineering Hydraulics, London and Basing-stoke.

## **Notizen**

## **Notizen**





Bundesministerium  
für Verkehr und  
digitale Infrastruktur



Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe  
Tel.: +49 (0) 721 9726-0 · Fax: +49 (0) 721 9726-4540

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg  
Tel.: +49 (0) 40 81908-0 · Fax: +49 (0) 40 81908-373

[www.baw.de](http://www.baw.de)