

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Proceedings, Published Version

PIANC Deutschland (Hg.)

Deutsche Beiträge. 33. Internationaler Schiffahrtskongress; San Francisco, USA, 01. - 05. Juni 2014

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

PIANC Deutschland

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104683>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

PIANC Deutschland (Hg.) (2014): Deutsche Beiträge. 33. Internationaler Schiffahrtskongress; San Francisco, USA, 01. - 05. Juni 2014. Bonn: PIANC Deutschland.

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.



PIANC•AIPCN

**The World Association for Waterborne Transport
Infrastructure**

**XXXIII.
Internationaler Schiffahrtskongress**

San Francisco (USA)

**33RD PIANC
WORLD CONGRESS
San Francisco 2014
June 1 to 5**



**Navigating
the New Millennium**
NAVIGATION • PORTS • WATERWAYS • ENVIRONMENT

01. - 05. Juni 2014



Deutsche Beiträge

Bonn 2014

Herausgeber: PIANC Deutschland
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Referat WS 12
Postfach 20 01 00
53170 Bonn

Druck: Druckerei des BMVI Bonn

- Alle Rechte vorbehalten -

Vervielfältigungen oder sonstige Nutzungen, auch auszugsweise, sind ohne schriftliche Zustimmung der deutschen Sektion von PIANC nicht gestattet.

Bonn, Dezember 2014

Vorwort

Gastgeber für den 33. Internationalen PIANC – Schifffahrtskongress, der vom 01.-05. Juni 2014 in San Francisco stattfand, war diesmal die US-amerikanische PIANC-Sektion. Im Jahr 1961 fand der letzte Kongress in den Vereinigten Staaten, in Baltimore, statt.

Globale Herausforderungen des 21. Jahrhunderts für die Schifffahrt und deren Infrastruktur im Binnen- und maritimen Bereich, wie Klimawandel und dessen Auswirkungen auf Wasserstraßen, Häfen und Schifffahrt im Binnen- und maritimen Bereich als auch Fragen der Berücksichtigung von Umwelt und Natur bei aktuellen Maßnahmen nehmen einen breiten Raum in den fachlichen Schwerpunkten des Kongresses ein. Im Bereich der Seeschifffahrt fordern die Abmessungen zukünftiger Großcontainerschiffe die Hafenbetreiber, Umschlagsfirmen aber auch die Wasserstraßenbehörden zur Lösung einer Vielzahl von Problemen. Gleichfalls stoßen sicher Informationen aus erster Hand zu großen Infrastrukturprojekten wie zum Beispiel die Erweiterung des Panama-Kanals, den Bau der Verbindung Seine-Schelde und das Vorhaben Maasvlakte 2 auf breites Interesse.

Komplexer werdende Aufgabenstellungen im Bereich Schifffahrt/Wasserstraßen - verbunden mit dem Bestreben, das Wissen um das Systemverständnis des Verkehrsträgers vom anerkannten Stand der Technik bis hin zum Stand der Wissenschaft zu erweitern - verlangen zwingend internationale Kooperationen und Fachaustausch der Experten und Praktiker.

Durch den breiten Teilnehmerkreis aus allen Kontinenten, die Diskussion in den Kongressforen sowie das einzigartige Fachspektrum der Vorträge tragen gerade die von PIANC veranstalteten Schifffahrtskongresse zu einem breiten Wissenstransfer bei.

Dieser gegenseitige Austausch kommt vor allem der Qualität von Planung, Bau, Betrieb und Unterhaltung der Infrastrukturen für die Schifffahrt zugute. Technische, ökonomische und ökologische Wirkungen unserer Fachgebiete können vielfach nur noch im internationalen Kontext betrachtet werden. Die Schifffahrtskongresse von PIANC leisten dazu einen hervorragenden Beitrag.

PIANC Deutschland hat - wie bei den vergangenen Kongressen - die Langfassung der deutschen Beiträge zur Information aller Interessierten des deutschsprachigen Raumes in dem vorliegenden Band zusammengefasst.

Dankenswerterweise haben dabei auch die Autorinnen und Autoren, deren Beiträge als Posterpräsentation angenommen wurden, ihre Ausarbeitungen mit eingebracht.

Ich danke ausdrücklich allen Autorinnen und Autoren, die sich auf dem weltweit renommierten PIANC-Forum mit ihren Ergebnissen und Projekten einbringen und damit in den Dienst des konstruktiven Erfahrungsaustausches und Wissenstransfers stellen.

PIANC
- Abteilung Deutschland -



Dipl.-Ing. Michael Behrendt
Chefdelegierter
Direktor und Professor der Bundesanstalt für Gewässerkunde

XXXIII. Internationaler Schifffahrtskongress

San Francisco (USA)

(01. - 05. Juni 2014)

ÜBERSICHT ÜBER DIE KONGRESSTHEMEN UND DIE DEUTSCHEN BEITRÄGE

	Seite
Hafenbau und -infrastruktur	
ANLEGEGESCHWINDIGKEITEN VON GROßCONTAINERSCHIFFEN Dipl.-Ing. Christian Hein , bremenports GmbH & Co. KG, Bremerhaven	1
ANALYSE DER VERTÄUKRÄFTE AM GEPLANTEN OFFSHORE TERMINAL BREMERHAVEN Dipl.-Ing. Anja Brüning , DHI, HØrsholm Dr. Oliver Stoschek , DHI-WASY GmbH, Syke Dipl.-Ing. Dominic Spinnreker , DHI-WASY GmbH, Syke Dipl.-Ing. Ulrich Kraus , bremenports GmbH & Co. KG, Bremerhaven	6
Schleusen	
PIANC ARBEITSGRUPPE 155: SCHIFFSVERHALTEN IN SCHLEUSEN UND SCHLEUSENVORHÄFEN Dr.-Ing. Carsten Thorenz , Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe	17
SCHLEUSE LÜNEBURG - EINE 38 M-SCHLEUSE IN DEUTSCHLAND Dipl.-Ing. Thilo Wachholz , Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Außenstelle West, Hannover	25
Fortschritte in der Informations- und Kommunikationstechnologie	
BINNENSCHIFFFAHRTSINFORMATIONSDIENSTE IN DEUTSCHLAND Dipl.-Ing. Nils Braunroth , Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn Dipl.-Ing. Stefan Bober , Fachstelle der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes für Verkehrstechniken, Koblenz	33
VIRTUELLE NAVIGATION FÜR BINNENSCHIFFE IN FLIEßGEWÄSSERN Dipl.-Ing. Alexander Lutz , Universität Stuttgart, Institut für Systemdynamik, Stuttgart Dipl.-Ing. Thorsten Dettmann , Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe Dipl.-Ing. Rolf Zentgraft , Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe	48
Schifffahrt und Wasserstraßen im Tiefwasserbereich	
EINFLUSS DES SCHRAUBENSTRAHLS AUS SCHIFFFAHRT AUF SEDIMENT- RESUSPENSION UND SOHLEROSION Dr. Oliver Stoschek , DHI-WASY GmbH, Syke Dr. Elimar Precht , DHI-WASY GmbH, Syke Dr. Ole Larsen , DHI Water & Environment (S) Pte. Ltd., Singapur Mamta Jain (Ph. D.), DHI Water & Environment (S) Pte. Ltd., Singapur Lars Yde (ChEng), DHI Water & Environment (S) Pte. Ltd., Singapur Dipl.-Ing. Nino Ohle , HPA Hamburg Port Authority, Hamburg Dipl.-Ing. Thomas Strotmann , HPA Hamburg Port Authority, Hamburg	57

Schutz des Lebensraumes, Eingriffsminderung und Renaturierung

- ERFAHRUNGEN MIT DER „WORKING-WITH-NATURE“ (WwN) PROJEKTDATENBANK UND DEM WwN-AUSZEICHNUNGSSYSTEM 64
Dr. Elmar **Fuchs**, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- HERSTELLUNG DER ÖKOLOGISCHEN DURCHGÄNGIGKEIT DER BUNDESWASSER-
STRÄßEN - EINE HERAUSFORDERUNG IN MEHRFACH GENUTZTEN FLÜSSEN 71
Dr. Matthias **Scholten**, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Dipl.-Biol. Christian **von Landwüst**, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Dr. Roman **Weichert**, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
Dr. Jochen **Koop**, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Dr. Dorothe **Herpertz**, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn
- PRAXISORIENTIERTE FORSCHUNG IM ELBEÄSTUAR – GELEGENHEITEN ZUR
FÖRDERUNG VON „WORKING-WITH-NATURE“ 80
Dipl.-Geograph Uwe **Schröder**, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Dr. Carolin **Schmidt-Wygash**, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Dipl.-Geoökologin Maika **Heuner**, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Dr. Elmar **Fuchs**, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Binnenwasserstraßen

- SACHSTAND DER PIANC INCOM WG 141: BEMESSUNGSGRUNDLAGEN FÜR
BINNENWASSERSTRASSEN 86
Dr.-Ing. Bernhard **Söhngen**, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
Dr. Katrien **Eloot**, Flämische Regierung, Ministerium für Mobilität und öffentliche
Arbeiten, Forschung im Bereich Wasserbau, Flandern
- MODELLIERUNG UND SIMULATION DES VERKEHRSFLOSSES AUF BINNEN-
WASSERSTRÄßEN 105
Dr. Nicolas **Fischer**, TU Dresden, Institut für Wirtschaft und Verkehr, Dresden
Dr. Martin **Treiber**, TU Dresden, Institut für Wirtschaft und Verkehr, Dresden
Dr.-Ing. Bernhard **Söhngen**, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- TOWARDS SHORT-TERM COLLISION DETECTION ON INLAND WATERWAYS BASED
ON POSITIONING, NAVIGATION AND TIMING DATA
Dr.-Ing. Alexander **Born**, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für
Kommunikation und Navigation, Neustrelitz
Iván **Herrera Pinzón**, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für
Kommunikation und Navigation, Neustrelitz
(Nur in englischer Fassung in den Kongressunterlagen verfügbar.)

Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

- DIE AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF WASSERSTRÄßEN UND
SCHIFFFAHRT IN DEUTSCHLAND EINSCHÄTZEN: UNTERSTÜTZUNG FÜR
ENTSCHEIDUNG ZUR ANPASSUNG 121
Dr. Sebastian **Kofalk**, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Dipl.-Ing. Stefanie **Wienhaus**, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Dr.-Ing. Hans **Moser**, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Dr. Annegret **Gratzki**, Deutscher Wetterdienst, Offenbach
Dr. Hartmut **Heinrich**, Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg
Dr.-Ing. Harro **Heyer**, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Panama-Kanal

ANPASSUNG AN DEN KLIMAWANDEL IM PANAMA-KANAL

134

Prof. Dr. Michele **Acciario**, Kühne Logistics University - Wissenschaftliche Hochschule für Logistik und Unternehmensführung, Hamburg

Sicherheit und Risikomanagement

BEMESSUNG VON WASSERBAUWERKEN IM BINNENBEREICH NACH DEM
TEILSICHERHEITSKONZEPT (PIANC WG 140)

149

Dipl.-Ing. Claus **Kunz**, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Nassbaggerung

Chancen in der Arktis

Küsteningenieurwesen

Life-Cycle-Management - Umgang mit alternder Infrastruktur

Systemansatz für die Betriebsführung

Grüne Infrastruktur und praktische Anwendungen

Sedimentation und Sedimentmanagement in Wasserstraßen

Globale Ziele: Partnerschaft

Fahrgast- und Kreuzfahrtschiffe, Fähren

Planung und Gestaltung von Marinas

Planung und Betrieb von Seehäfen und Terminals

Innovative Investitionen in die Infrastruktur

Binnenhäfen und Terminals

Ufergestaltung in städtischen Bereichen und für Erholungszwecke

Seehäfen und Seeschifffahrt

Anlegegeschwindigkeiten von Großcontainerschiffen

Dipl.-Ing. Christian Hein
bremenports GmbH & Co. KG, Bremerhaven

Zusammenfassung

Bei der Ermittlung und Auswertung von real gemessenen Anlegegeschwindigkeiten von Großcontainerschiffen konnte zumindest für den als exponiert geltenden Standort Bremerhaven festgestellt werden, dass die mittleren Anlegegeschwindigkeiten deutlich unter den Angaben der Bemessungsempfehlungen liegen. Insbesondere bei der Größe der Anlegewinkel sind deutlich geringere Werte gemessen worden, als die heute geltenden Empfehlungen ausweisen. Falls es durch die geschilderte Betrachtungsweise einer kumulierten Energiesumme des Gesamtsystems gelingen würde, die aktuellen Bemessungsmethoden anzupassen, könnte dies in Zukunft dazu führen, dass Fendersysteme insbesondere für Großcontainerschiffe deutlich wirtschaftlicher zu planen und realisieren sind.

1. Einleitung

Seit der Indienstellung der E-Klasse von der Maersk-Reederei laufen seit dem Jahre 2006 regelmäßig Großcontainerschiffe den Containerterminal Bremerhaven/Deutschland an. Seit einem halben Jahr ist der Hafenstandort nun auch Anlaufpunkt der Triple-E-Klasse, und musste sich mit den gesteigerten Anforderungen durch Anlegemanöver und deren Wirkungen auf die Kajenbauwerke auseinander setzen. Da die deterministischen Bemessungsrichtlinien (PIANC Guidelines for the Design of Fender Systems 2002, Marcom Report of WG 33) [1] für Schiffe dieser Größenordnungen konstante und nicht mehr differenzierte Annäherungsgeschwindigkeit ausweisen, wurde eine Anlage konzipiert, die vollautomatisch in der Lage ist, die realen Anlegegeschwindigkeiten von Großcontainerschiffen zu messen und auszuwerten.

In dieser Ausarbeitung werden die Anlage und ihre Funktionalität beschrieben. Es werden im Anschluss die Ergebnisse aus über 1000 Anlegevorgängen beschrieben und analysiert. Abschließend werden die Ergebnisse der Auswertung mit den Empfehlungen der Bemessungsrichtlinien verglichen und ein Ausblick über mögliche weitere Schlussfolgerungen gegeben.

2. Geschwindigkeitsmessanlage

2.1 Anlegegeschwindigkeit

Die Anlegegeschwindigkeit eines Schiffes ist die entscheidende Bemessungsgröße bei der Ermittlung von Anlegeenergien. Mit der berechneten Energie wird letztendlich das erforderliche Arbeitsvermögen der Fender ermittelt, und der Fender dementsprechend ausgewählt. Die Herleitung der deterministischen Bemessungsmethode der PIANC beruht auf der Grundgleichung der kinetischen Energie.

$$E = 1/2 m \cdot v^2 \quad (\text{kinetische Energie})$$

Da die Geschwindigkeitskomponente in der Gleichung quadratisch berücksichtigt wird, können schon geringe Abweichungen bei der Festlegung der Anlegegeschwindigkeit zu großen Differenzen bei den Energiewerten führen.

Für die Bemessung der Anlegeenergie wird im Folgenden die Bemessungsmethode des PIANC-Reports von 2002 [„Guidelines of the Design of Fender Systems“] herangezogen. Seit 2004 ist diese Bemessungsmethode auch in den „EAU – Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen“ aufgeführt.

Normale Anlegeenergie (Normal Berthing Energy)

$$E_N = 0,5 \cdot M_D \cdot (V_B)^2 \cdot C_M \cdot C_E \cdot C_S \cdot C_C$$

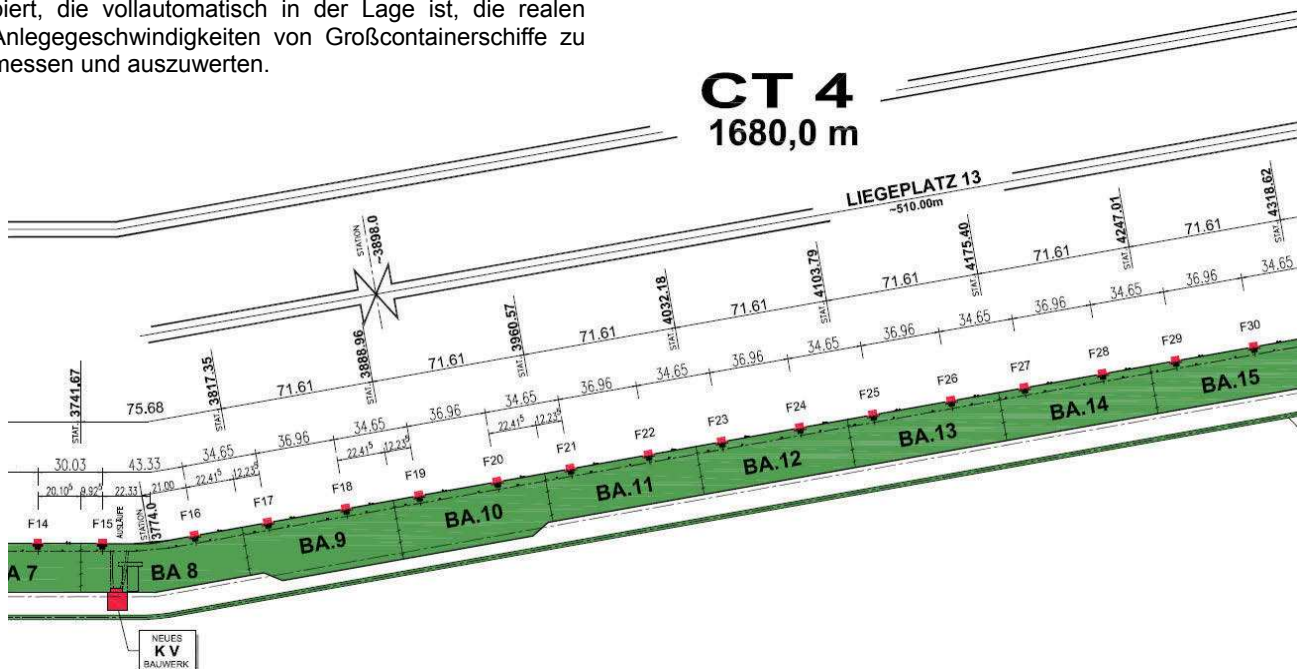


Abbildung 1: Messbereich am CT 4 Bremerhaven (bremenports)

Hierbei ist:

- M_D** = Schiffsverdrängung in t (Displacement)
- V_B** = Anlegegeschwindigkeit in m/s (Berthing Velocity)
- C_M** = Koeffizient des virtuellen Massenfaktors (Added Mass Coefficient)
- C_E** = Exzentrizitätskoeffizient (Excentricity Coefficient)
- C_S** = Dämpfungsfaktor des Uferbauwerks (Berth's Configuration Coefficient)
- C_c** = Nachgiebigkeitsfaktor (Sofness Coefficient)

2.2 Technische Konzeption

Um die Messwerte vorwiegend großer Schiffsgrößen zu erhalten, wurde ein fest installiertes Messsystem am Containerterminal Bremerhaven in einem Bereich platziert, an dem in der Regel die größten Containereinheiten anlegen. Aufgrund der exponierten Lage entschied man sich für ein auf Radartechnologie basierendes und stationäres Messsystem, das automatisch rund um die Uhr Anlegevorgänge elektronisch aufzeichnet. Hierzu sind auf einer Länge von rund 430 m dreizehn Sensoren angebracht, die zu einem jeweils zugehörigen Schwimmfender die Anlegegeschwindigkeit des Schiffes und die Kompression des Fenders beim Anlegevorgang misst.

Die einzelnen Radargeräte sind auf die Außenkante des Fenders justiert, so dass Verformungen und Geschwindigkeiten mit einer maximalen Abweichung von +/- 3 mm sehr genau aufgezeichnet werden können. Ab einer Distanz von 30 m erkennt das System vollautomatisch ein anlegendes Schiff und zeichnet den Anlegevorgang über kurze Messintervalle von min. 2 Messungen pro Sekunde auf.

Hierdurch werden je nach Schiffsgröße bis zu 10 Geschwindigkeitskomponenten am Schiff erfasst. Die für eine spätere Energieberechnung erforderliche Schiffsverdrängung in Tonnen erhält das System zunächst aus dem AIS-System (Automatic Identification System). Aus diesem System werden Daten, wie Schiffsname, Ort, Uhrzeit und insbesondere der Tiefgang zur Verfügung gestellt.

Über für die meisten Schiffstypen vorliegende Loading-scales können bei der Auswertung der Ergebnisse sehr genaue Aussagen über die Wasserverdrängung, und damit der Schiffsmasse in Tonnen während des Anlegevorganges gemacht werden.

2.3 Aufbereitung der Messergebnisse

Die Daten werden via Netzwerkverbindung direkt an die Datenbank ACRON weitergeleitet, das die Informationen dann in graphischer und tabellarischer Form an den Nutzer ausgibt. Alle Prozessdaten werden archiviert und sind jederzeit wieder abrufbar. Die Auswertungsergebnisse werden auf einer Bildschirmoberfläche graphisch dargestellt und können bei Bedarf in Echtzeit verfolgt werden. Hierbei werden interessante, visuelle Effekte wie das Drehen des Schiffes um die Schwerpunktschwerachse dargestellt.

Bei der Betrachtung der reinen Zahlenwerte der Ergebnisse wären solche Effekte nur sehr schwer nachvollziehbar. Die Sensoren messen in regelmäßigen, zeitlichen Abständen die Entfernung zur Schiffshaut und ermitteln über die Distanzmessungen die Anlegegeschwindigkeiten. Die Darstellung der Geschwindigkeit erfolgt über ein grafisches Koordinatensystem mit einer Zeit-Weg-Achse.

Das Messsystem wurde in seiner Entstehungsphase eigentlich ausschließlich für die Erfassung der Annäherungsgeschwindigkeit bis zum Kontaktpunkt mit dem Fender konzipiert. Jedoch wurde auch die Bewegung über den Kontaktpunkt hinaus aufgezeichnet, und so erhielt man neben den maximalen Verformungsdaten des Fenders auch die negative Beschleunigung des Schiffes. Damit liefert dieses System eine hervorragende Möglichkeit, die reale Verformung eines Fenders, und damit den zugehörigen Energiewert zu ermitteln, welcher sich aufgrund eines spezifischen und nicht theoretischen Anlegevorgangs eingestellt hat.

Eine solche Betrachtungsmöglichkeit am Real-System ist nach Wissensstand des Autors derzeit weltweit einmalig, und bietet die Möglichkeit, theoretisch ermittelte Anlegeenergien nach der PIANC [1] mit am Realsystem gemessenen Energien zu vergleichen. Durch einen solchen Vergleich ist es möglich, Abweichungen der gemessenen Energiewerte zu erkennen, und zu erforschen, warum die Bemessungsvorschriften möglicherweise ein anderes Ergebnis liefern.



Abbildung 2: Radarsensor (Bremerports)

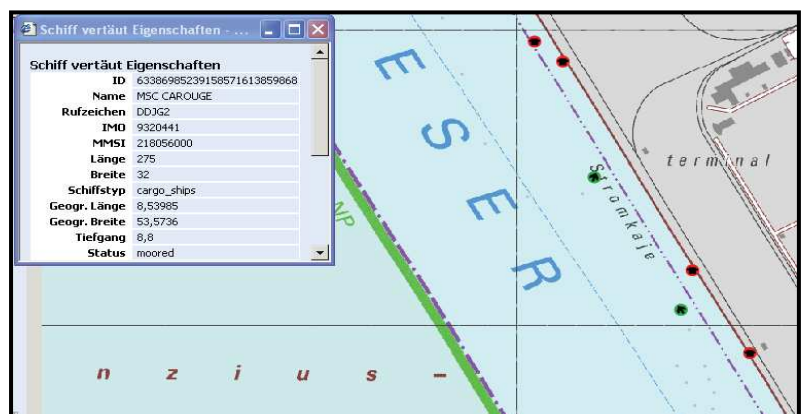


Abbildung 3: AIS Ausschnitt Containerterminal Bremerhaven

Hafenbau- und infrastruktur

Anlegegeschwindigkeiten von Großcontainerschiffen

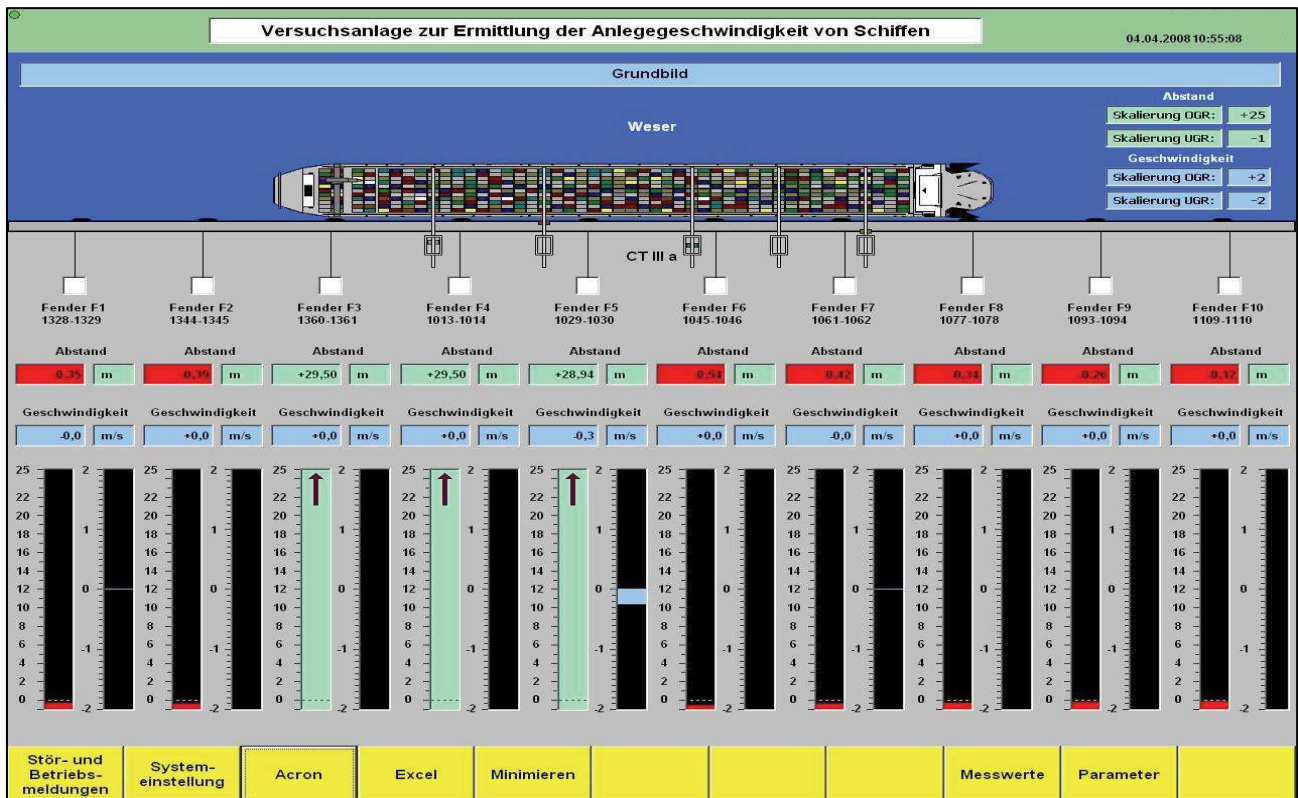


Abbildung 4: visuelle Bildschirmdarstellung

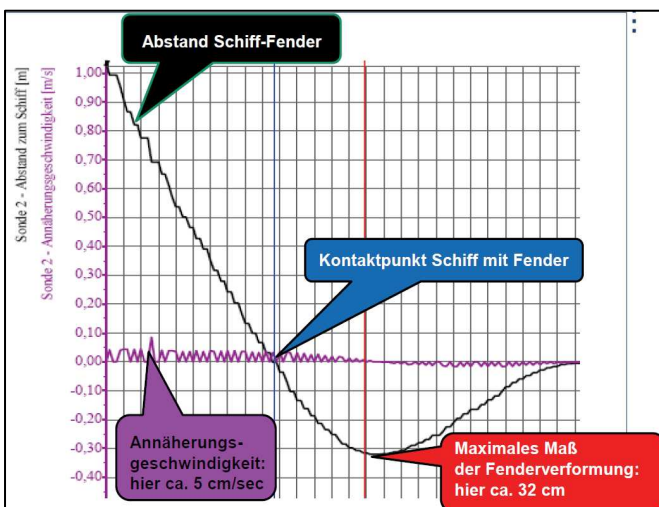


Abbildung 5: Grafik Anlegebewegung

3. Ergebnisse

Im Folgenden werden nun die Ergebnisse aus einer Messdauer von 4 Jahren präsentiert. Während dieses Zeitraumes wurden 1082 verwertbare Anlegevorgänge aufgezeichnet und ausgewertet. Aus den Datensätzen lassen sich u. A. folgende Kerndaten darstellen:

- Anlegegeschwindigkeit zum Kontaktzeitpunkt Schiff-Fender
- Anlegewinkel des Schiffes
- Kompression der beanspruchten Fender
- Gesamtanlegeenergie des Vorganges

Bei den gemessenen Anlegegeschwindigkeiten sind recht große Abweichungen in beide Richtungen zu erkennen. Liegt gerade bei den großen Schiffen die mittlere Geschwindigkeit bei ca. 5 cm/sec, so sind die Extremwerte (bis zu 17 cm/sec) wesentlich größer.

Wird im Rahmen der Bemessungstabellen nach der spanischen ROM [2] und der EAU [3] für die hier dargestellte Schiffsklasse eine einheitliche Annäherungsgeschwindigkeit von 20 cm/sec (ungünstige Bedingungen/mit Schlepperhilfe) für die Berechnung zugrunde gelegt, so darf hinterfragt werden, ob die Abweichungen dieser Bemessungsgröße in Hinblick auf die gemessenen Durchschnittswerte nicht zu groß sind. Aufgrund der bereits angesprochenen Quadrat dieser Werte wird eine rechnerische Erhöhung (5 cm/sec zu 20 cm/sec) der Energiewerte mit dem Faktor 16 erzeugt.

Inwieweit für künftige Geschwindigkeitsannahmen hieraus Rückschlüsse gezogen werden dürfen, ist insbesondere in Bezug auf Sicherheitsreserven des Fendersystems und möglichen Havarieschäden bei missglückten Anlegevorgängen ein noch zu diskutierender Punkt, der mit Sicherheit bei der Überarbeitung der Geschwindigkeitstabellen in der PIANC Arbeitsgruppe WG 145 hinreichend berücksichtigt wird.

Bei den Ergebnissen bezüglich der Anlegewinkel sind die Ergebnisse jedoch sehr eindeutig.

Hafenbau- und infrastruktur
Anlegegeschwindigkeiten von Großcontainerschiffen

Schiffsname	Anlegegeschwindigkeit [m/s]	Wasserverdrängung [t]	Anlegewinkel
Edith Maersk	(max) 0,173	150000	0,16
Estelle Maersk	(min) 0,011	156500	0,17
	(ø) 0,053	171750	0,38
	0,032	154500	(ø) 0,24
Emma Maersk	0,037	154950	(min) 0,02
Eleonora Maersk	0,085	179500	(max) 0,82

Abbildung 6: Zusammenfassung Werte (Anlegegeschwindigkeit und Anlegewinkel)

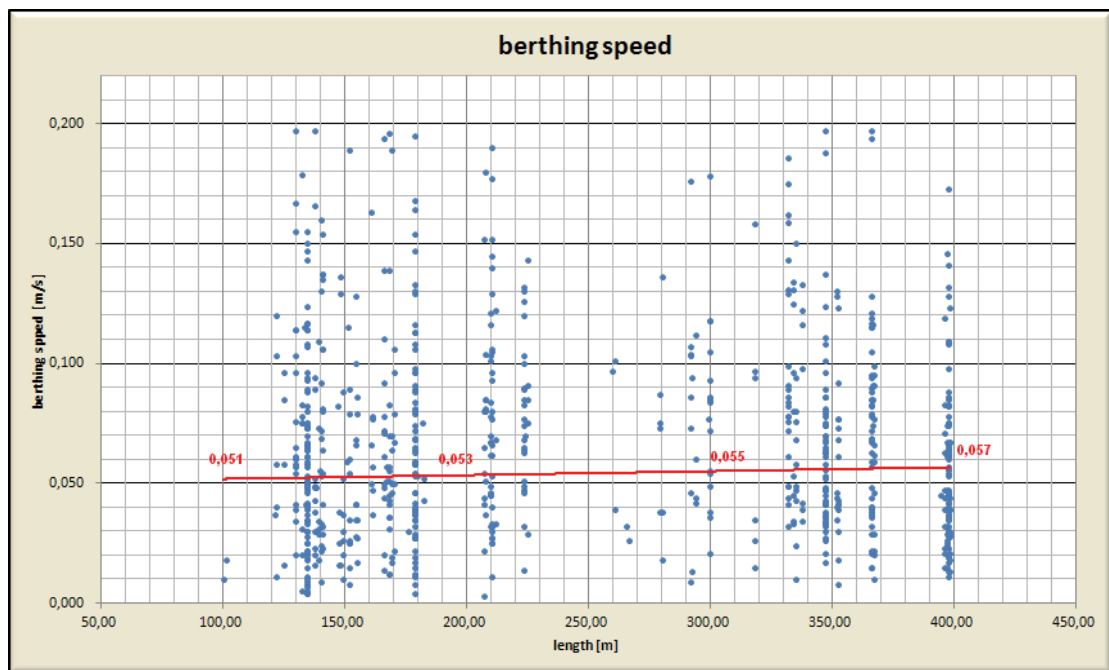


Abbildung 7: Anlegegeschwindigkeiten in Abhängigkeit zur Schiffslänge

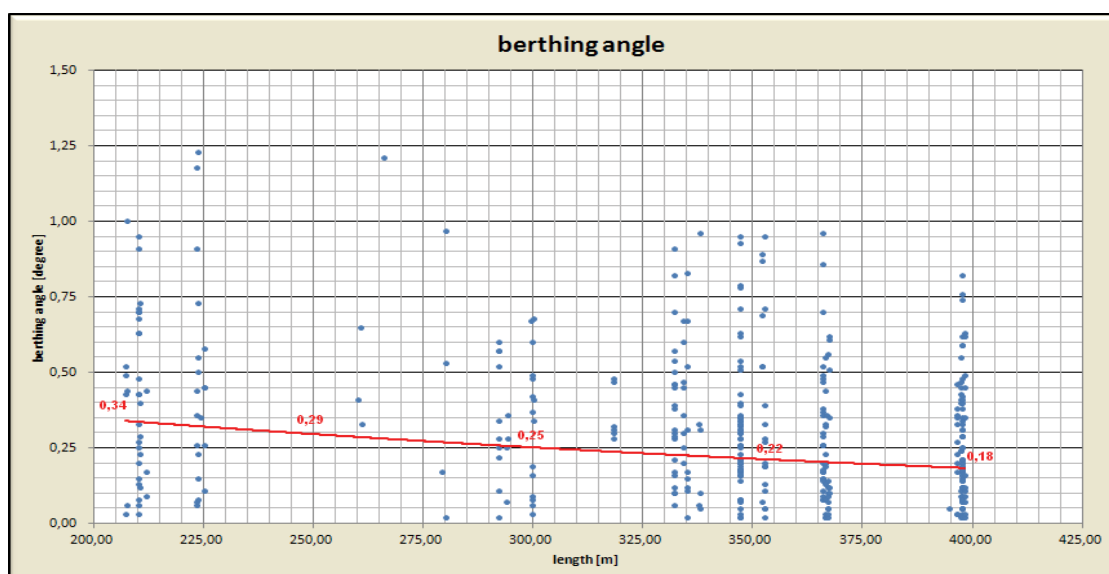


Abbildung 8: Anlegewinkel in Abhängigkeit zur Schiffslänge

Für die Bemessung nach den Bemessungsrichtlinien der PIANC [1] werden für die großen Schiffsklasse 6° als rechnerischer Anlegewinkel empfohlen. Diese Werte werden für die Berechnung des Exzentrizitätskoeffizienten herangezogen. Im Rahmen der Ergebnisauswertung wurden deutlich geringere Anlegewinkel gemessen. So liegt bei den größten Schiffseinheiten der größte, je gemessene Anlegewinkel bei 0,82°. Die durchschnittlichen Anlegewinkel betragen 0,24°.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass heutzutage bei den Anlegemanövern von Großcontainerschiffen von einem nahezu parallel Anlegen auszugehen ist. Dies ist aus geometrischen Gründen auch gar nicht mehr anders möglich. Würde ein Großcontainerschiff heute mit einem Anlegewinkel von > 5° anlegen, würden die übertragenden, geschwungenen Bugpartien des Schiffes über den Pierbereich ragen. Das Schiff, und möglicherweise Hafensuprastrukturen könnten erheblich beschädigt werden.

Daraus lässt sich herleiten, dass die bisherigen Bemessungsannahmen, nach der die gesamte Anlegeenergie von einem einzelnen Fender aufzunehmen ist, Überdenkens würdig sind.

Durch die aufgezeichneten Vorgänge lässt sich zweifelsfrei ermitteln, dass bei allen Anlegevorgängen aufgrund des niedrigen Anlegewinkels immer mehrere Fender beansprucht wurden, und demnach die Energiewerte der jeweiligen Fenderkompressionen nach Auffassung des Autors kumuliert im Gesamtsystem zu betrachten sind. Diese Sichtweise würde zu einer deutlichen Entspannung bei der Fenderbemessung insbesondere der neuen Schiffsgrößen sein.

Literatur

[1] PIANC Guidelines for the Design of Fender Systems 2002, Marcom Report of WG 33

[2] ROM (Recommendations für Maritime Works), Puertos del Estado

[3] EAU 2012 (Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" Häfen und Wasserstraßen), Ernst & Sohn

Verfasser

Dipl.-Ing. Christian Hein

bremenports GmbH & Co. KG

Am Strom 2

27568 Bremerhaven

Tel.: 0471/30901-0

E-Mail: office@bremenports.de

Analyse der Vertäukräfte am geplanten Offshore Terminal Bremerhaven

Dipl.-Ing. Anja Brüning
DHI, Hørsholm

Dr. Oliver Stoschek
DHI-WASY GmbH, Syke

Dipl.-Ing. Dominic Spinnreker
DHI-WASY GmbH, Syke

Dipl.-Ing. Ulrich Kraus
Bremenports GmbH & Co. KG, Bremerhaven

Zusammenfassung

Brechende Trossen von Schiffen ist eines der desaströsesten Ereignisse, welches während Hafen- und Terminalarbeiten die Produktivität und besonders die Sicherheit gefährdet. Aus diesem Grund ist eine dynamische Analyse der Schiffsbewegungen und Vertäukungskräfte für Hafenbehörden erforderlich.

Besonders in engen Fahrwassern und nah angrenzenden Terminals mit limitierten Navigationsmöglichkeiten für den Schiffsverkehr sind langperiodische, instationäre Wellen (Sunk und Schwall) infolge der Vorbeifahrt von Schiffen von Bedeutung. Derzeit ist es nicht möglich, die durch Schiffspassage induzierten Kräfte in den Festmacherleinen aus den gegebenen Richtlinien abzuleiten. Daher wird hier ein kombinierter Modellansatz bestehend aus DHIs hydrodynamischem Modell MIKE 21 und WAMIT® verwendet.

Die vorliegende Fallstudie konzentriert sich auf die Ermittlung der operativen Sicherheit des geplanten Offshore Terminal Bremerhaven (OTB) für gravierende Schiffsverkehrssituationen. Die betrachteten Fälle sind aus einer Matrix von nautischen Simulationen abgeleitet, welche im Rahmen des Projektes durchgeführt wurden. Entsprechend konnten die für die Simulation der Schiffspassage angesetzten Parameter festgelegt werden. Die Eingangsdaten für die vertäuten Schiffe und Kajenausüstung wurden zusammen mit dem Kunden definiert. Diese Zusammenstellung beruht auf Annahmen der zukünftig am Terminal operierenden Schiffe, Richtlinien und bisher eingesetzten Hafenausüstungen.

Die in diesem Beitrag beschriebene Methodik wurde zum ersten Mal in einem deutschen Genehmigungsprozess verwendet. Die Ergebnisse der dynamischen Analyse bestätigen im Grundsatz das vorgeschlagene Vertäukonzept für das „Worst Case“ Szenario einer Schiffspassage.

1. Einleitung

Um seine Vorrangstellung als einen der wichtigsten Häfen für die Offshore Wind Industrie in Norddeutschland zu behaupten, verfolgt Bremerhaven den Ausbau und die Weiterentwicklung des früheren „Fischereihafens“. Zur Unterstützung, dieses im industriellen Um- und Aufbruch befindlichen Bereiches, ist geplant, durch die Erbauung eines neuen Offshore Terminals im Bereich des Blexer Bogens, jenen mit der bestmöglichen Infrastruktur für den Umschlag von Komponenten für die ansässige Offshore Wind Industrie auszustatten (Abbildung 1).

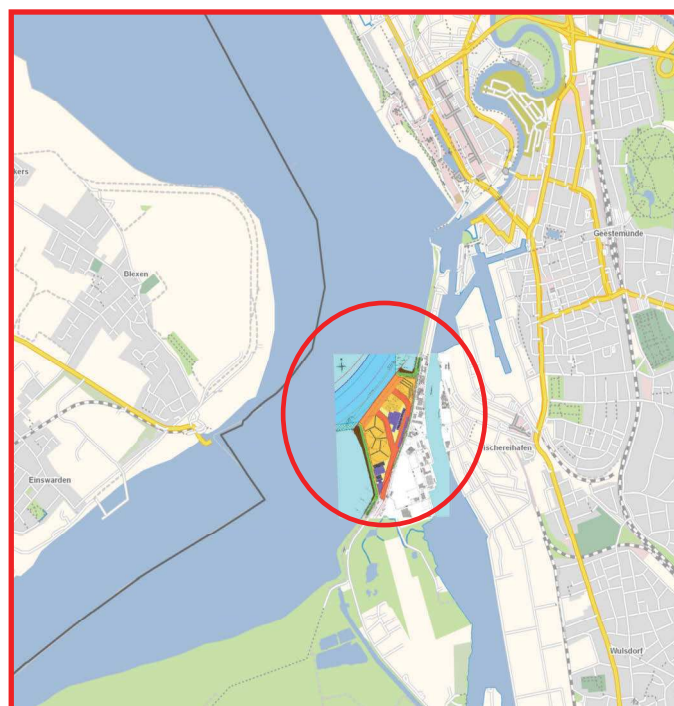


Abbildung 1: Lage des geplanten Offshore-Terminals Bremerhaven (Entwurf: bremenports GmbH & Co.KG) im „Blexer Bogen“ (Bild © OpenStreetmap)

Die geplante Wassertiefe am vorgesehenen Terminal ist -14.1m MSL, während die Fahrrinne in der Umgebung des Terminals bis zu -19.0m MSL tief ist.

Um das Festmachen und Operieren (Be- und Entladen) der vorgesehenen Schiffe sicherzustellen, müssen die verwendeten Trossen- und Fendersysteme den unterschiedlichsten äußeren Kräften standhalten. Gefährdung für Material und Menschen besteht neben unerfahrenem Umgang mit der Vertäukung, durch signifikante Schiffsbewegungen und den daraus resultierenden Rückstellkräften in den Trossen infolge externer Einwirkungen.

Typische äußere Einwirkkräfte sind:

- Wind
- Strömung
- Wellen
- Passierende Schifffahrt

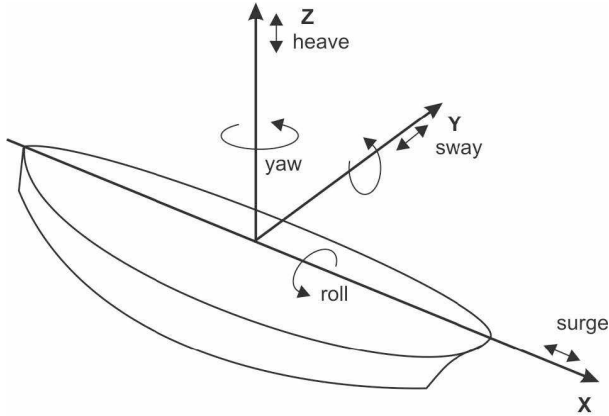


Abbildung 2: Definition der Schiffsbewegungen (3 Translationen und 3 Rotationen)

Im "Blexer Bogen" passieren große Bulker das geplante Terminal in geringem Abstand von circa 270m (siehe Abbildung 3, Grüne Linie). Aufgrund dieser Gegebenheit wird voraussichtlich ein Zusammenspiel von Schiffverkehr und Vertäukräften auftreten.

bremenports GmbH & Co. KG beauftragte DHI, in einer Studie die Sicherheit der voraussichtlich an diesem Terminal vertäuten Schiffe zu untersuchen. Da eine Einschränkung der Fahrtgeschwindigkeit an dieser Stelle inakzeptable ist, galt zu prüfen, dass der durch die Vorbeifahrt induzierte Schwall und Sunk das jeweils vorgesehene Vertäusystem nicht gefährdet.

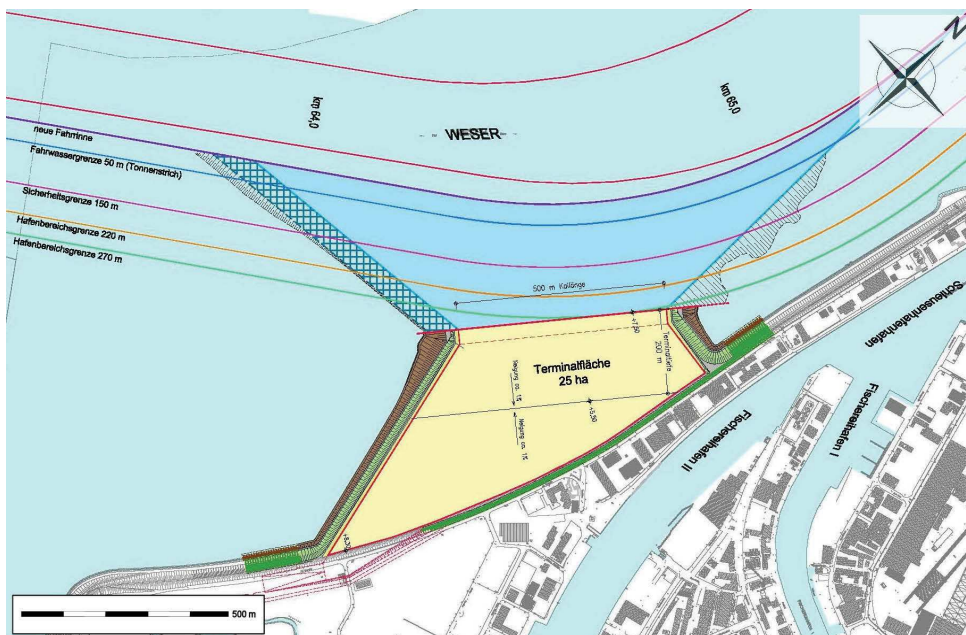


Abbildung 3: Layout des geplanten Offshore-Terminals Bremerhaven (bremenports GmbH & Co.KG)

2. Methodik

Das zur Berechnung der Schiffsbewegungen und Vertäukräfte verwendete Modell WAMSIM ist eine von DHI entwickelte Software. Sie wird nach Stand der Technik zur Analyse dynamischer Vertäulasten von schwimmenden Körpern unter externen Krafteinwirkungen eingesetzt. Hierzu werden neben geometrischen und materialspezifischen, auch hydrodynamische Eigenschaften des Körpers benötigt. Die sogenannten Frequenzganglinien werden mit Hilfe der Software WAMIT (WAMIT, 2011) ermittelt.

WAMSIM führt eine Fourier-Transformation der Frequenzganglinien durch und ermittelt daraus das Impulsansprechverhalten des Körpers. Dieses geht mit den äußeren dynamischen Einwirkungen, wie z. B. eintreffenden Wellen, Hydrostatik, Vertäuerung, Wind, Strömungen und viskosen Dämpfungskräften in die Bewegungsgleichungen für den Körper ein, welche für alle sechs Freiheitsgrade gelöst werden. Die generelle Qualität von WAMSIM wurde mit Hilfe physikalischer Modellversuche validiert (Christensen et al. 2008).

Um die verschiedenen Vertäukonzepte der Schiffstypen zu untersuchen, mussten vorab zwei maßgebliche Eingangsinformationen für die WAMSIM Simulationen ermittelt werden (siehe Abbildung 4).

Die Sammlung und Aufbereitung der Eingangsdaten für die Modellierung (z. B. Schiffshüllen/ 3D-Rumpfformen, Annahme der geplanten Ausführung und Ausrüstung des Terminals, Eigenschaften der verwendeten Trosen) umfassten einen Großteil des Arbeitsaufwandes.

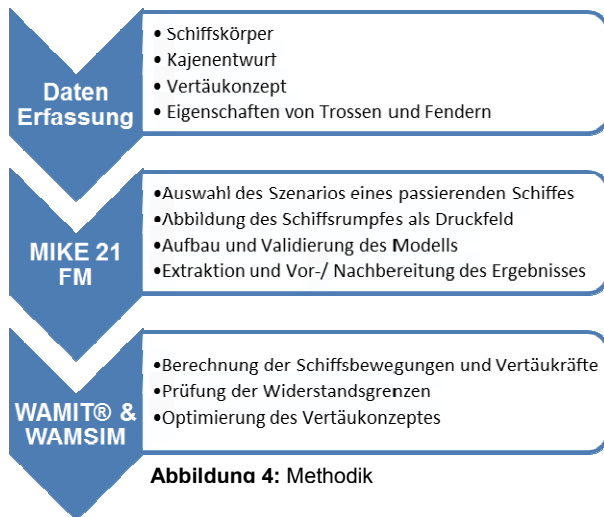
Als erster Schritt erfolgte die Modellierung verschiedener Szenarios des passierenden Verkehrs mit MIKE 21. Um die Vorbeifahrt möglichst genau abzubilden, wurde ein hydrodynamisches Modell mit hoher Auflösung erstellt. Passierende Schiffe konnten in das Modell integriert werden, indem das definierte verdrängte Wasservolumen sich mit festgelegter Geschwindigkeit entlang eines vorgegebenen Weges durch das Modellgebiet bewegt. Die entstehenden, modellierten „schiffs-

generierten“ Wellen wurden mit in-situ Messungen verglichen, um die Modellergebnisse zu validieren. Verschiedene Fälle mit unterschiedlichen Schiffsgeschwindigkeiten und Passierabständen zum Offshore Terminal wurden untersucht.

Im zweiten Schritt wurden die hydrodynamischen Modellergebnisse aus dem Nahbereich des Terminals mit der Modellsoftware WAMSIM gekoppelt. WAMSIM berücksichtigt die angegebenen Geometrien der vertäuten Schiffe, welche durch die induzierten Schwall

und Sunk Kräfte in Bewegung versetzt werden. Als Ergebnis einer dynamischen Berechnung werden die-Bewegungsganglinien sowie die implizierten Trossen- und Fenderkräfte ausgegeben. Diese Methodik wurde bereits in einigen praktischen Anwendungsfällen verwendet, wie zum Beispiel für den Hafen von Brisbane (Mortensen et al. 2009).

Im Verlauf der Untersuchung wurden die initialen Vertäupläne iterativ verbessert.



3. Simulation des Schwall und Sunks

Die Größe des Schwall und Sunk Effekts, bzw. des Absunks an einem fahrenden Schiff, ist in vielen verschiedenen Formeln in Abhängigkeit von den Schiffseigenschaften und der Kanalkonfiguration (Briggs, 2006) und BAW (2006) beschrieben:

- Schiffsdimensionen (Schiffsform repräsentiert durch Länge, Breite, Tiefgang und Blockkoeffizient) und Schiffsgeschwindigkeit
- Abstand zum Kanalufer und der Sohle abgebildet durch die Kanaltiefe und der Querschnittsform.

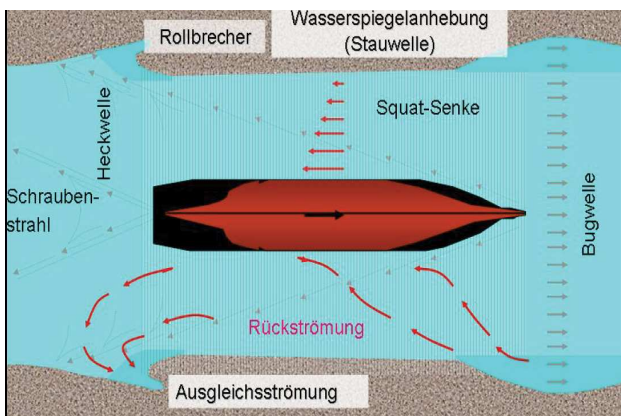


Abbildung 5: Squat-Effekt bei symmetrischer Fahrt (BAW, 2006)

Des Weiteren berücksichtigen die Formeln lediglich eine mittige Schiffspassage in einem graden Kanalabschnitt mit einer konstanten Geschwindigkeit.

Der Effekt des Wasserspiegelabsunkes und der zugehörigen Ausgleichsströmungen ist auch am Uferrand als eine langperiodische Wellenbewegung bemerkbar und hängt in seiner Größenordnung ab von der Schiffsgeschwindigkeit, dem Passierabstand und dem Verhältnis zwischen dem Schiffs- und Kanalquerschnitt.

Wuebben (1995) hat physikalische Untersuchungen (in-situ) an den Great Lakes durchgeführt, um die Wirkung dieser Größen auf den Absunk zu bestimmen. Die BAW (2006) untersuchte diesen Zusammenhang in der Weser. Eine generelle Auswirkung des bewegten Wasserkörpers ist in Abbildung 5 dargestellt.

Abbildung 6 zeigt schematisch die lokal gemessene Auslenkung des Wasserspiegels infolge einer Schiffspassage. Zu erkennen ist die langperiodische Wellenbewegung (Bugstau, s_B , Absunk und Primärwelle, H_P) gefolgt von den kurzperiodischen Sekundärwellen.

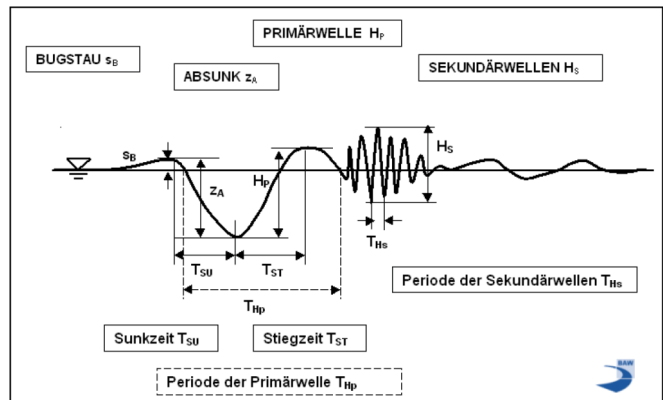


Abbildung 6: Seitliche Ansicht des Schiffswellensystems am Standort des Beobachters (BAW, 2006)

Infolge der hydrodynamischen Druckveränderungen entstehen große Variationen des Wasserspiegels mit lang anhaltenden und hohen lokalen Strömungen. Diese Kräfte sind bedeutende Lasten, welche signifikante Bewegungen bei schwach vertäuten Schiffen hervorrufen können.

Aufgrund fehlender Berücksichtigung von komplexeren Einflüssen wie bathymetrischen Änderungen, Kurvenfahrt und variierendem Passierabstand in den oben genannten Formeln, verwendet DHI den Ansatz eines bewegten Druckfeldes, um die vorliegenden physikalischen Zusammenhänge numerisch in einem hydrodynamischen MIKE 21 FM Modell abbilden zu können. Die Hauptparameter des passierenden Verkehrs, Kurs und Maximalgeschwindigkeit, wurden in das Modell übertragen. Eine Validierung dieses Ansatzes präsentierte bereits in Mortensen et al. (2009) in Form eines Vergleiches mit physikalischen Modellversuchen.

3.1 Hydrodynamisches Modell, MIKE 21 Flow Model FM

MIKE 21 Flow Model FM ist ein numerischer Lösungsansatz für zweidimensionale, tiefengemittelte Oberflächenströmungen. Diese Modellsoftware ist für Simulationen von hydraulischen und ökologischen Phänomenen in Seen, Ästuaren, Buchten, Küstenzonen und Meeren einsetzbar, wenn eine Stratifikation vernachlässigt werden kann.

sigt werden kann. Der Modellansatz verwendet für die räumliche Diskretisierung ein unstrukturiertes Gitter (Mesh) sowie einen Finite-Volumen-Lösungsansatz. Für weitere Informationen zur MIKE 21 FM Modellsoftware wird auf (DHI, 2014) verwiesen.

Das Modell umfasst die Weser ca. 5 km flussauf- und flussabwärts des Offshore Terminals Bremerhaven. Ein flexibles Modelgitter bestehend aus einer Kombination von triangularen (geböschtem Flussufer) und quadrangularen (tiefe Fahrrinne) Elementen wurde für eine optimale räumliche Auflösung der Bathymetrie eingesetzt. Dieses ermöglicht eine genaue Abbildung der dimensionierten Verdrängung eines passierenden Schiffes als integriertes Druckfeld (siehe Abbildung 7) und der Ausbildung des Absunk.

Abbildung 7 zeigt eine Nahaufnahme der Gitterauflösung in der Umgebung des OTB. Die Auflösung der Dreieckselemente waren maximal 8 m². In der Fahrrinne wurden Viereckselemente mit einer Auflösung von ca. 2,25 m² verwendet. Hintergrund dieser hohen Gitterauflösung war die bestmögliche Wiedergabe der Wellendeformation.

Die für die Interpolation verwendeten Bathymetrischen Daten wurden von der Hochschule Bremen zur Verfügung gestellt.

Weiter beinhaltet das hydrodynamische Modell folgendes:

- stationäre Randbedingungen: konstanter Wasserstand, keine Tide oder Abflussströmungen
- verdrängtes Wasservolumen (in Raum und Zeit) implementiert als bewegtes Druckfeld mit Anfangsbedingung: zweidimensionaler konstanter Wasserstand (s. o.) mit „eingestanztem“ verdrängtem Wasservolumen am Startpunkt des passierenden Schiffes/ Druckfeld

Der für den Simulationszeitraum zugrunde gelegte Wasserstand wurde auf Basis der vorliegenden Informationen vom Pegel „Alter Leuchtturm“ in Bremerhaven abgelesen.

3.2 Validierung des numerischen Modells

Der oben beschriebene Ansatz wurde bisher bereits in verschiedenen Häfen weltweit verwendet, jedoch noch nie für die Bedingungen der norddeutschen Ästuare erprobt. Um die Anwendbarkeit für die Weser zu prüfen, konnten vorliegende in-situ Messungen der langperiodischen Schiffswellen in Dedesdorf verwendet (BAW, 2006b) werden. Diese Messkampagne dokumentierte vorrangig die Passage zweier Schiffstypen, die in ihren Eigenschaften auch relevant für die späteren Simulationen am OTB waren. Beobachtungen des generierten Absunkes durch einen Bulker (Panmax size) und einem Frachtschiff wurden für die Validierung berücksichtigt.

Vier verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Tidewasserständen, Passierabständen, Schiffstypen und Geschwindigkeiten wurden für die Überprüfung der numerischen Abbildbarkeit des Absunkes und folglich der Güte des Ansatzes berechnet. Tabelle 1 fasst die Parameter zusammen.

Datum/Zeit	Wasserstand	Schiffsdaten				Passierabstand	
		Typ	Tiefgang	SOG	Kurs	Kleinsiel D1	Dedesdorf D2
23.10.2005/15:19	+0,91 mMSL	Westerstahl (Bulker)	10,4 m	10 kn	179°N	318 m	414m
24.10.2005/07:06	+1,00 mMSL	Westerstahl (Bulker)	7,1 m	12 kn	356°N	381 m	351 m
05.11.2005/20:07	+0,74 mMSL	Star Ikebana (Frachtschiff)	8,7 m	14,1 kn	355°N	390 m	342 m
08.11.2005/03:30	+1,26 mMSL	Westerstahl (Bulker)	10,1 m	9,3 kn	184°N	278 m	454m

Tabelle 1: Parameter der Validierungsrechnungen

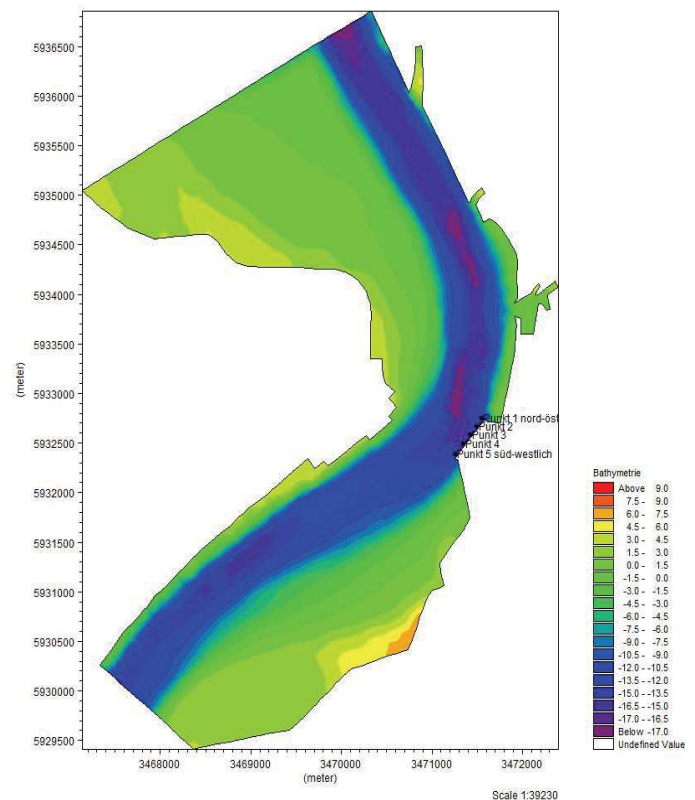
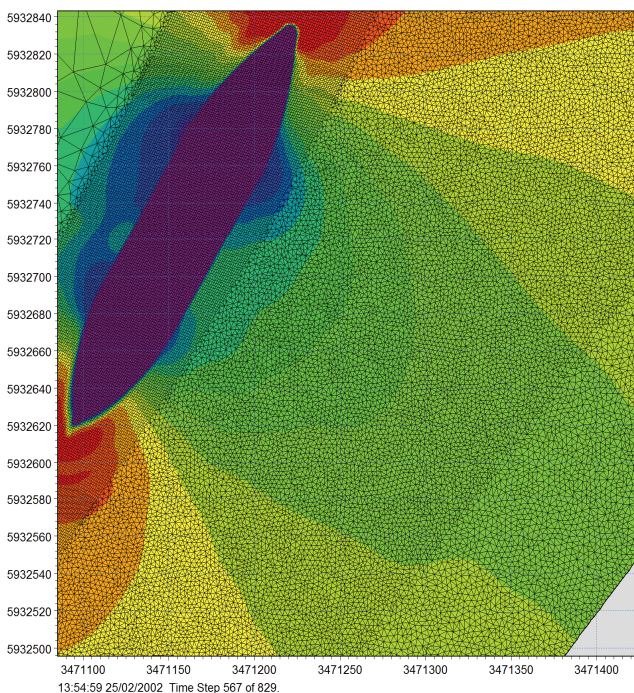


Abbildung 7: links: Passierendes Schiff - Druckfeld integriert im Modellgitter nahe dem OTB; rechts: Bathymetry des Modellgebietes

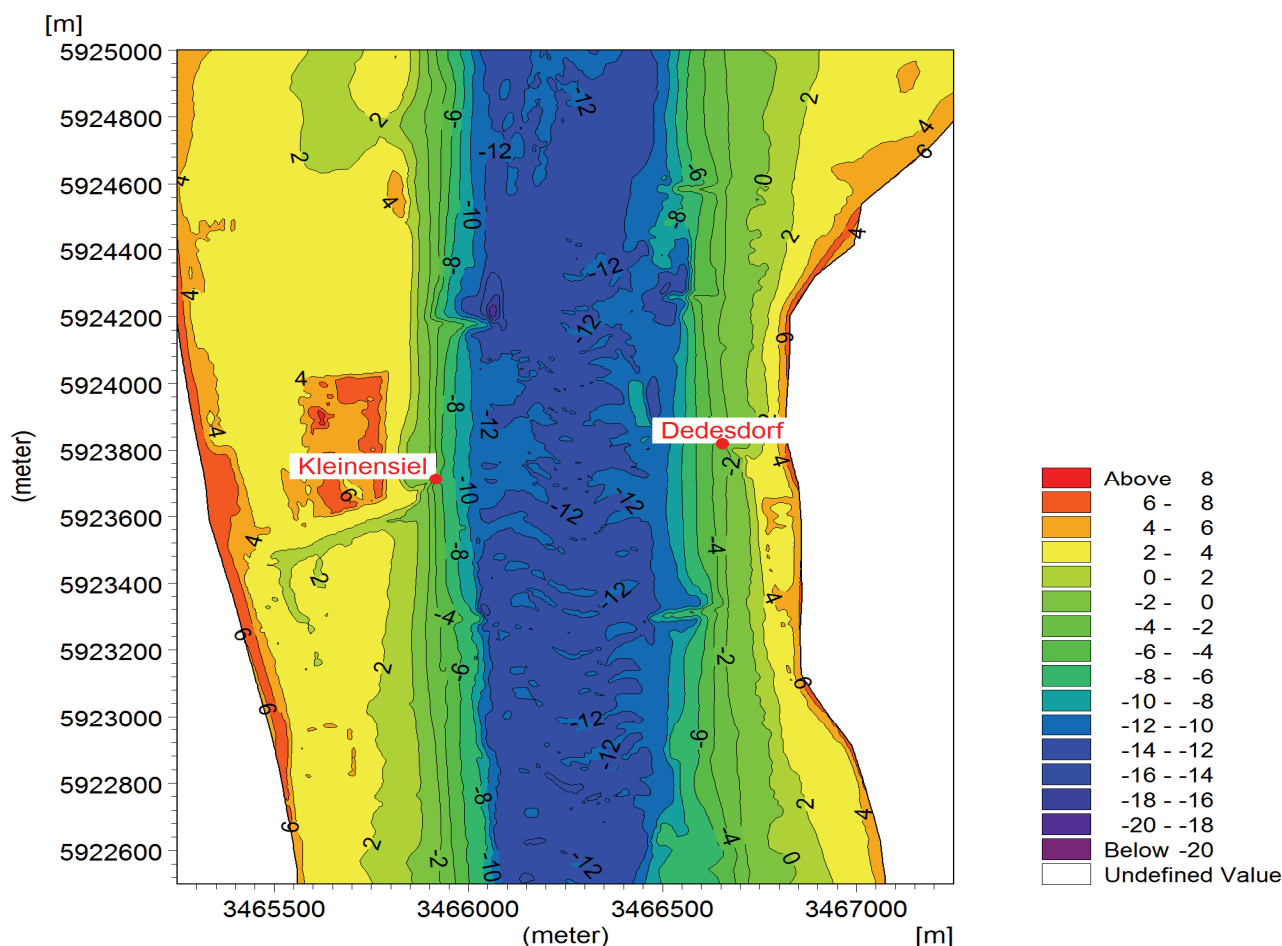


Abbildung 8: Bathymetrie der Weser im Abschnitt zwischen Dedesdorf und Kleinesiel (inklusive Messstation)

Abbildung 8 zeigt den Simulationsbereich für den Weserabschnitt bei Dedesdorf. Messgeräte waren an beiden Uferseiten an den Anladungspfählen der früheren Fährverbindung Kleinesiel (D1)-Dedesdorf (D2) befestigt.

Die maximalen modellierten und gemessenen Absunkwerte sind in Tabelle 2 gegenübergestellt. Abbildung 9 zeigt eine graphische Darstellung. Man kann festhalten, dass der modellierte Absunk in guter Übereinstimmung mit den Messungen steht, obwohl in den meisten Fällen eine Tendenz zur Überschätzung des gemessenen Absunkes festzustellen ist.

Datum	Typ	Vergleich							
		Modellergebnisse				Messungen			
		Absunk z _A [m]		Primärwellenhöhe H _p [m]		Absunk z _A [m]		Primärwellenhöhe H _p [m]	
		D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
23.10.2005	Weserstahl (Bulker)	0,14	0,11	0,11	0,10	0,08	0,07	0,08	0,12
24.10.2005	Weserstahl (Bulker)	0,13	0,17	0,11	0,12	0,15	0,12	0,10	0,10
05.11.2005	Star Ikebana (Frachtschiff)	0,48	0,83	0,31	0,71	0,31	0,50	0,39	0,59
08.11.2005	Weserstahl (Bulker)	0,11	0,08	0,08	0,06	0,07	0,04	0,08	0,02

Tabelle 2: Modellergebnisse versus in-situ Messungen

Vergleicht man die Ergebnisse des Bulklers *Weserstahl* vom 23.10.2005 und dem 08.11. 2005, so ist festzustellen, dass der größere Passierabstand, die geringere Schiffsgeschwindigkeit und die erhöhte Kieffreiheit (bedingt durch geringeren Tiefgang und/oder höheren Wasserstand) eine verringerte Ausbildung des Absunkes und der Primärwellenhöhe am 08.11.2005 zur Folge hat.

Starke Abweichungen in der Größe der Ergebnisse konnten für die beiden stromauf fahrenden Schiffe am 24.10.2005 und 05.11.2005 ermittelt werden, Obwohl der Passierabstand nahezu gleich war, ist der Absunk und die Primärwellenhöhe des Frachters *Star Ikebana* mehr als doppelt so groß. Es ist anzunehmen, dass dieses neben der geringeren Kieffreiheit und der anderen Schiffsform insbesondere auf die erhöhte Geschwindigkeit zurückzuführen ist.

Der Grund für die Diskrepanz zwischen modellierten und gemessenen Werten für die Passage der *Star Ikebana* konnte nicht abschließend geklärt werden. Dennoch zeigte die Validierung, dass das Modell in der Lage ist ein „Worst Case“ Szenario ausreichend gut abzubilden. Zusätzlich kann festgehalten werden, dass die Tendenz der Überschätzung von Absunk und Primärwelle zu konservativen Ergebnissen führt.

3.3 Schiffspassage am OTB

Für das Genehmigungsverfahren zum Offshore Terminal Bremerhaven wurden nautische Simulationen mit Hilfe der Weserlotsen durchgeführt, um den Einfluss des Bauwerkes auf den Schiffsverkehr zu ermitteln (Morgenstern, 2011). Dabei lag ein Hauptaugenmerk auf der Manövrierbarkeit der passierenden Schiffe, insbesondere bei der Vorbeifahrt am geplanten Terminal. Diese Simulationen beinhalteten sowohl einzelne Passagen als auch Begegnungsverkehr unter Tidenströmungs- und Windeinfluss.

Hafenbau- und infrastruktur

Analyse der Vertäukräfte am geplanten Offshore Terminal Bremerhaven

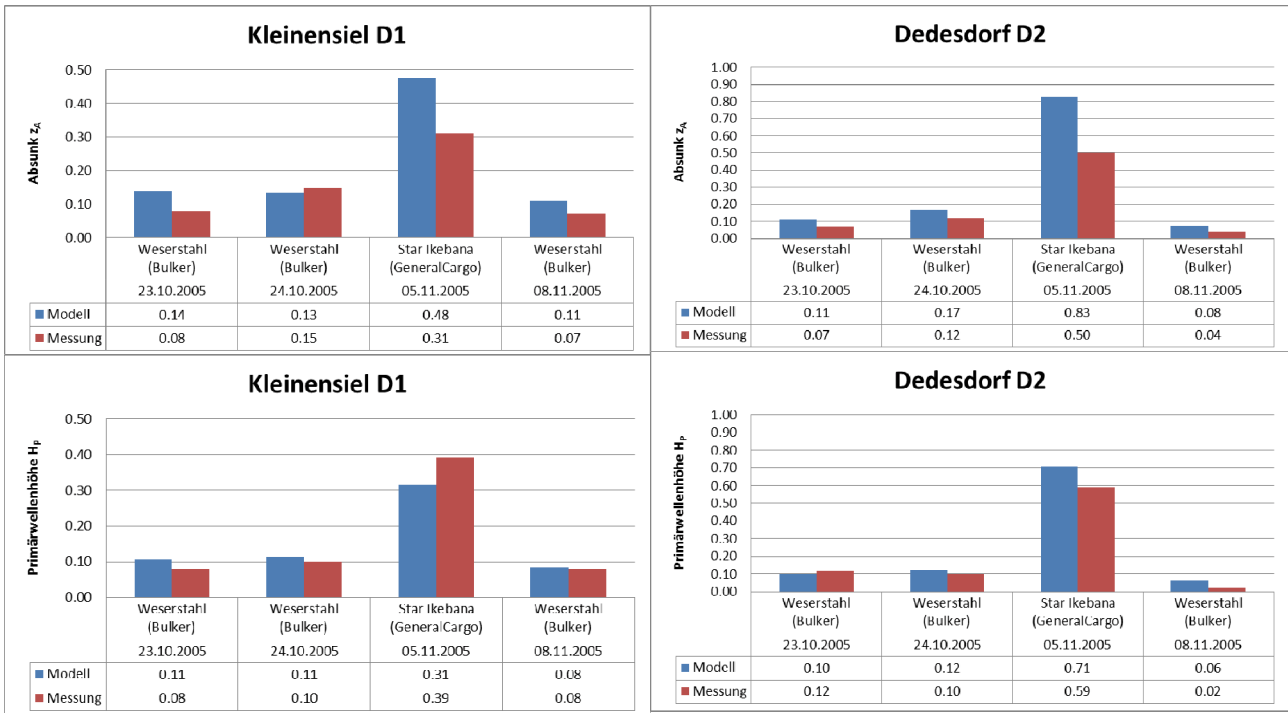


Abbildung 9: Absink (oben) und Primärwellenhöhe (unten) bei Kleinesiel und Dedesdorf

Zur Identifikation der kritischen Schiffpassagen wurden die nautischen Simulationen anhand der Schiffsgeschwindigkeiten (über Grund und durchs Wasser) und dem Passierabstand ausgewertet. Die größte der beiden Schiffsgeschwindigkeiten (Fahrt über Grund = SOG oder Fahrt durchs Wasser = STW) wurden als konservativer Ansatz im MIKE21 FM Model verwendet.

In den nautischen Simulationen konnten vereinzelt höhere Passagegeschwindigkeiten oder östlichere Kurse (geringere Distanz) identifiziert werden. Basierend auf diesen Informationen wurde ein zusätzliches „Worst Case“ Szenario als konservativer Ansatz abgeleitet. Eine Deformation der Welle aufgrund von Tidedrömung wurde in dieser Studie nicht berücksichtigt, da nur tideabhängige Schiffe für eine kritische Vorbeifahrt am Terminal in Frage kommen. Diese passieren das Terminal nur nahe Hochwasser und folglich bei geringer oder keiner Tidedrömung.

Abbildung 10 zeigt das Beispiel eines passierenden Bulklers (STW = 13kn) und die resultierende Wasserspiegellagenauslenkung am OTB für einen Ruhewasserstand von +1,76 mMSL. Das signifikante zweidimensionale Muster zeigt die instationäre Welle (Bugstau, Absink und Primärwelle). Das Modell gibt nicht die Sekundärwellen wieder.

Die Auslenkung der Wasserspiegellage wurde an mehreren Punkten entlang der Kaje in einem ungefähren Abstand von 20 m vor der Spundwand aus dem Modell extrahiert (Abbildung 11).

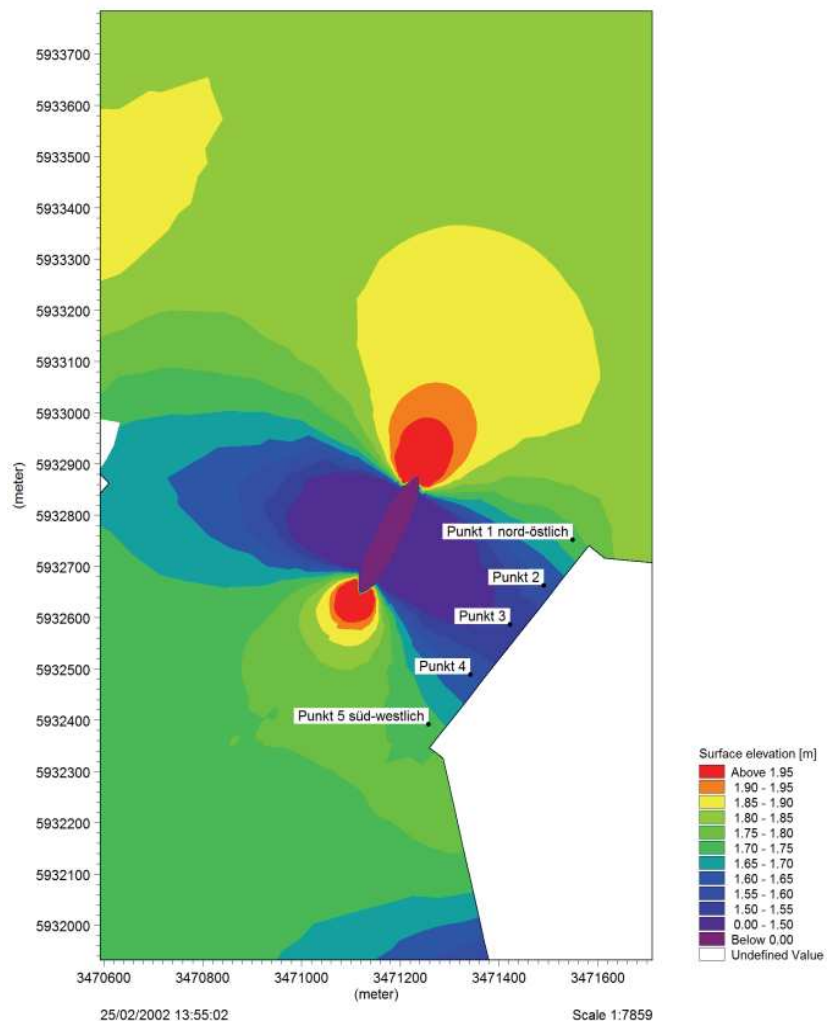


Abbildung 10: Passage eines Bulklers. Form der instationären Welle (Bugstau, Absink und primäre Heckwelle)

Hafenbau- und infrastruktur

Analyse der Vertäukräfte am geplanten Offshore Terminal Bremerhaven

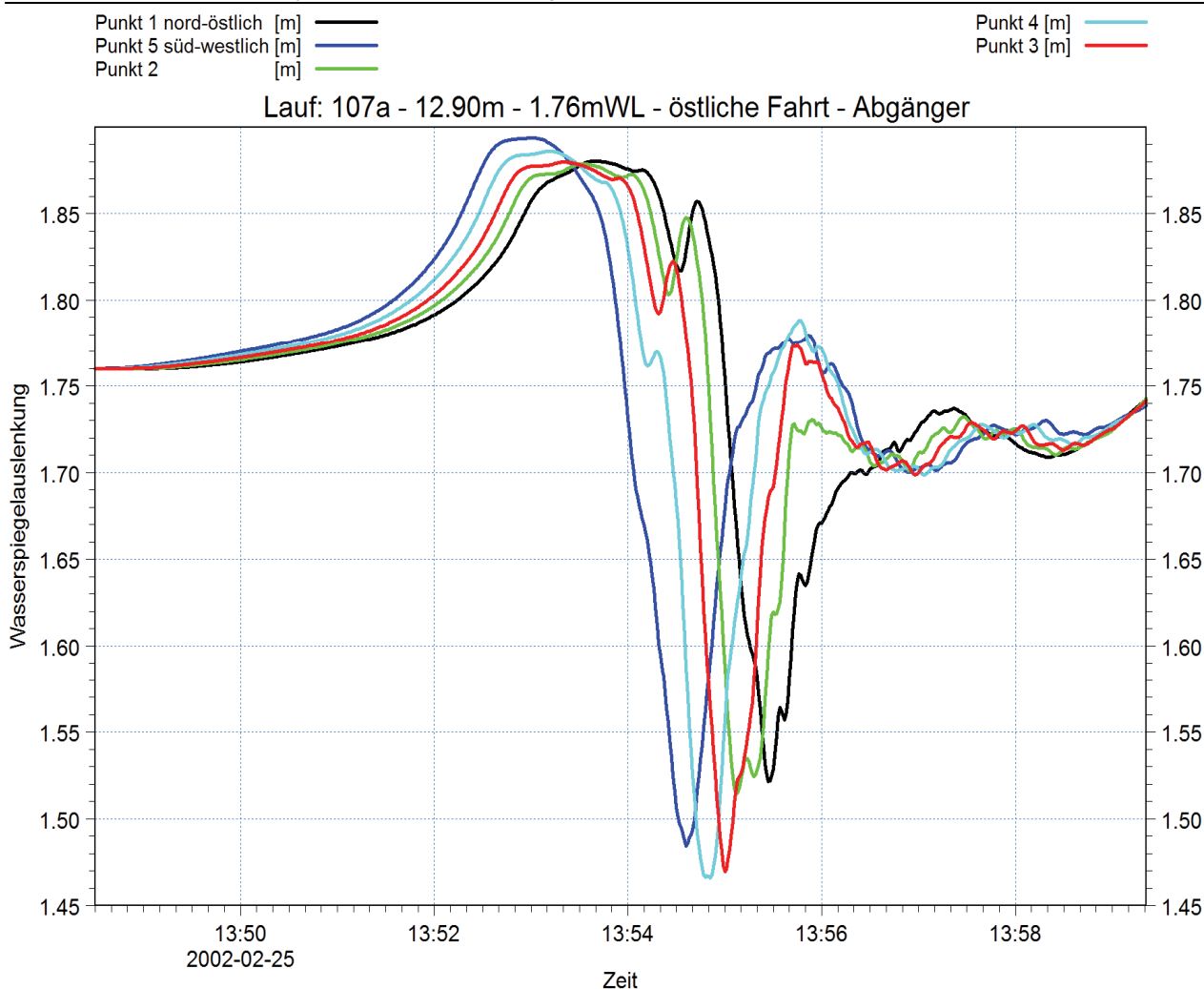


Abbildung 11: Extrahiertes Signal der simulierten Wasserspiegelauslenkung für einen flussabwärts fahrenden Bulker auf östlicher Kurslage – „Worst Case“ (Tidewasserstand: +1,76 mMSL)

Die Modellergebnisse der einzelnen Szenarien zeigten, dass der „Worst Case“ Fall den größten Absunkeffekt von ca. 40 cm am OTB hervorruft. Aufgrund dieses konservativen Ergebnisses wurde die Ermittlung der Schiffsbewegungen und Vertäukräfte für diesen Fall bestimmt.

4. Ermittlung von Schiffsbewegungen und Vertäukräften

Um den Einfluss des in MIKE 21 berechneten Primärwellensystems und den zugehörigen Strömungen auf die am OTB vertäuten Schiffseinheiten zu bestimmen, wurden die hydrodynamischen Ergebnisse im Nahbereich der Terminals extrahiert. Nach anschließender Bearbeitung konnten diese mit dem Zeitbereichsmodell WAMSIM gekoppelt werden. WAMSIM berücksichtigt neben anderen vorliegenden Schiffsgeometrien auch die der Offshore-Installationsschiffe, welche durch den Absunkeffekt der vorbeifahrenden Schiffe beeinflusst werden, und berechnet die Vertäukräfte aufgrund der Relativbewegungen der schwimmenden Schiffskörper. Ein weiterer Vorzug dieser Modellsoftware ist die Berücksichtigung der nicht linearen Interaktion zwischen externen Kräften, und den gekoppelten Eigenschaften des Vertäusystems (Fender und Trossen) im Vergleich zu einer vereinfachten statischen Berechnung.

4.1 Modellaufbau

Um die Schiffsbewegungen und Vertäukräfte nach dem oben beschriebenen Verfahren zu ermitteln, ist bestmögliche Kenntnis des verwendeten Vertäukonzeptes (geometrische Anordnung der Kajen - und Decks-ausrüstung, Fender- und Trosseneigenschaften) und der physikalischen Parameter der Bemessungsschiffe (Größe, Tiefgang, Verdrängung und vertikale Schwerpunkt-lage entsprechend Beladungszustand) von zentraler Bedeutung für die Verbindlichkeit der Ergebnisse. Die im Rahmen der Studie durchgeführten Simulationen berücksichtigten die in Tabelle 4 aufgelisteten Schiffe. Zusätzlich wurde für die Interaktion zwischen Schiff und Fender ein Reibungskoeffizient von $\mu = 0,4$ und eine Vorspannung der Leinen von 10 t angenommen; diese Werte basieren auf Erfahrungen.

In Absprache mit bremenports GmbH & Co.KG wurden für das Layout des Terminals in Anlehnung an das benachbarte Container Terminal CT4 folgende Annahmen getroffen:

- Blockabstand: 20m ($\leq 0,25 \text{ LoA} \approx 0,25 \cdot 90\text{m} = 22,5\text{m}$, siehe (PIANC, 2002))
- Doppelpoller: max. Last 200t, max. 4 Trossen
- Fender : Durchmesser 2,00m; Länge 3,50m

Die Anordnung der Fender und Poller erfolgte jeweils mittig in einem Block. Die Charakteristika der Fender sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Fabrikat	Typ	Durchmesser [m]	Länge [m]	Energie [kNm]	Reaktion [kN]
Trelleborg	Sea Guard	2,00	3,50	454	845

Tabelle 3: Eigenschaften der Fender

Die untersuchten Schiffstypen wurden durch bremenports GmbH & Co. KG auf Grundlage des geplanten Terminaleinsatzes festgelegt. Informationen zu Schiffsgrößen, Vertäuanordnungen an Deck und den verwendeten Trossen wurden bei den Schiffseignern/ Reedern angefragt und zusammengetragen. Für die Untersuchungen wurden vorab festgelegte Beladungsfälle (ballastiert/ beladen) definiert, welche den anzusetzenden Tiefgang und die Verdrängung der untersuchten Schiffe bestimmten. Die prinzipiellen Dimensionen der verwendeten Schiffstypen sind in Tabelle 4 aufgelistet, während die Eigenschaften der Festmacher in Tabelle 5 zu finden sind. Die digitalen Schiffsrümpfe (in Form entsprechend des Typus) aus der DHI - Datenbank wurden entsprechend der Angaben für das Modell skaliert. Ein Beispiel ist in Abbildung 12 dargestellt.

Schiffstyp	LüA [m]	Lpp [m]	Tiefgang [m]	Breite [m]
Frachtschiff P2-Klasse (ballastiert)	168,68	155,79	9,50	25,20
Ponton (ballastiert)	90,00	90,00	2,00	32,00
Ponton (beladen)	90,00	90,00	5,00	32,00
Jack-up Schiff 1 (ballastiert)	100,00	99,20	4,44	40,00
Jack-up Schiff 2 (ballastiert)	147,50	146,80	7,00	42,00

Tabelle 4: Schiffsdimensionen

Schiffstyp	Leinentyp/ Material	Durchmesser [mm]	Bruchlast (BL) [kN]	Anzahl
Frachtschiff P2-Klasse (ballastiert)	Polypropylene Octoply	64	480	8
Ponton (ballastiert/beladen)	Tipto Winchline	70	990	4
Jack-up Schiff 1 (ballastiert)	Geo Twin Polyamid	46	512	8
Jack-up Schiff 2 (ballastiert)	Tipto Winchline	64	850	12

Tabelle 5: Eigenschaften der verwendeten Festmacher

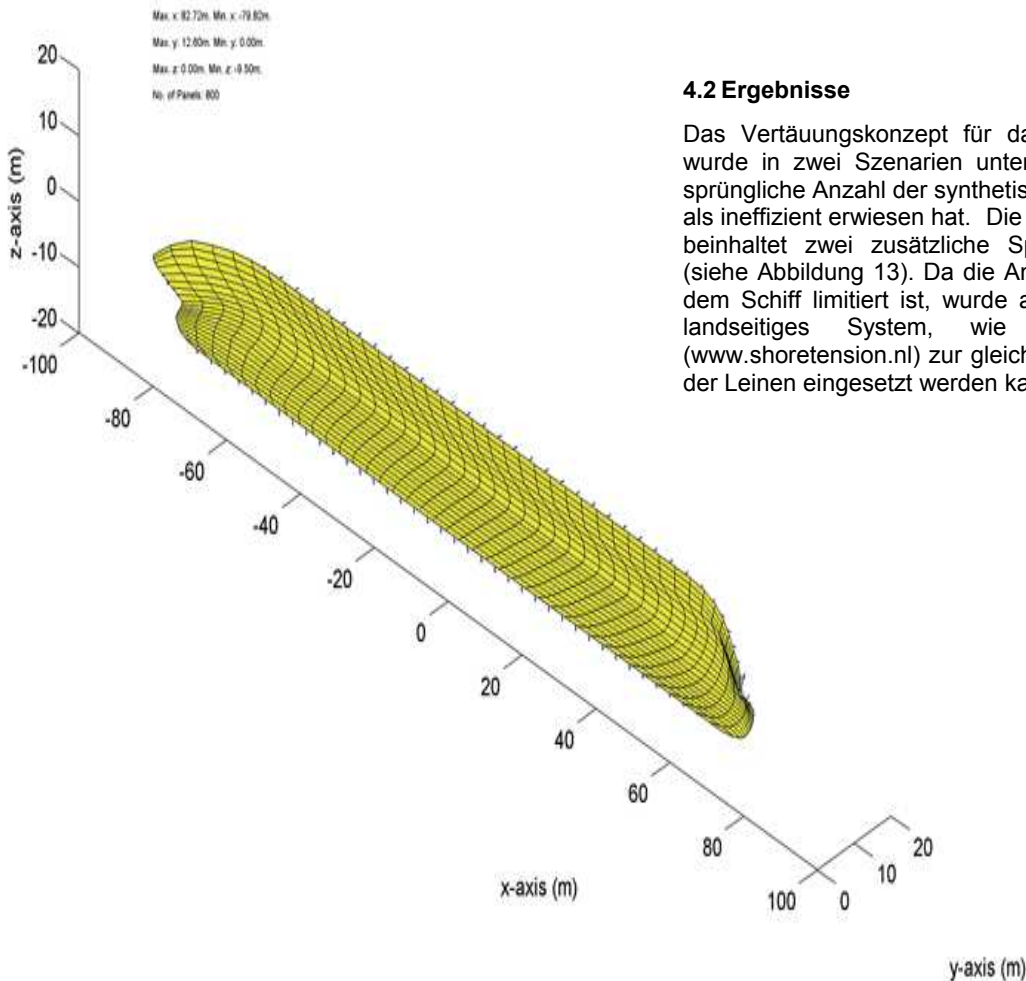


Abbildung 12: Digitalisierte Schiffshülle des Frachtschiffes - P2 Klasse(ballastiert)

4.2 Ergebnisse

Das Vertäukonzept für das Frachtschiff P2-800 wurde in zwei Szenarien untersucht, da sich die ursprüngliche Anzahl der synthetischen Festmacherleinen als ineffizient erwiesen hat. Die optimierte Vertäuerung beinhaltet zwei zusätzliche Spring- und Querleinen (siehe Abbildung 13). Da die Anzahl der Winschen auf dem Schiff limitiert ist, wurde angenommen, dass ein landseitiges System, wie z. B. ShoreTension (www.shoretension.nl) zur gleichmäßigen Vorspannung der Leinen eingesetzt werden kann.

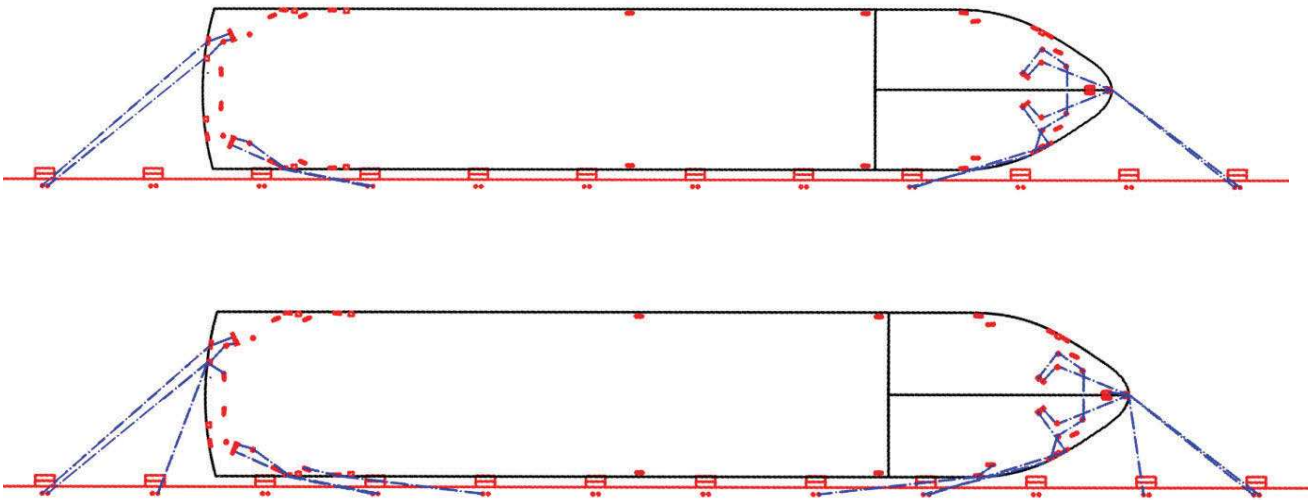


Abbildung 13: Frachtschiff P2-800: Initiales Vertäulayout (oben) und optimiertes Layout (unten)

In Bild 14 und Tabelle 6 ist ein Vergleich der während der Schiffspassage maximal auftretenden Bewegungen und Trossenkräfte für beide Vertäuungskonzepte dargestellt. Die Aufzeichnungen relativer Bewegungen basieren auf einer gemeinsamen Ausgangsposition des Schiffsschwerpunktes. Um die Bewegungen in Relation zum Absunk darzustellen, wurde die Auslenkung des Wasserspiegels am Schiffsschwerpunkt gemessen. Generell lag das Hauptaugenmerk auf den maximal auftretenden Werten.

Die Schiffsbewegung bei initialem Vertäulayout ohne jegliche Optimierung ist als gepunktete Linie gekennzeichnet. Eine große Driftbewegung „Schwoien“ in Richtung der Fahrinne wurde dabei durch die aktive Vorspannung der Trossen vermieden und somit ein stetiger Kontakt mit den Fendern gewährleistet. Tauchbewegungen sind nur in geringem Maße vorhanden und folgen in etwa der Auslenkung des Wasserspiegels. Hauptsächlich tritt eine Längsbewegung „Wogen“ (entlang der Kaje) auf, während die Rotationen gering bleiben.

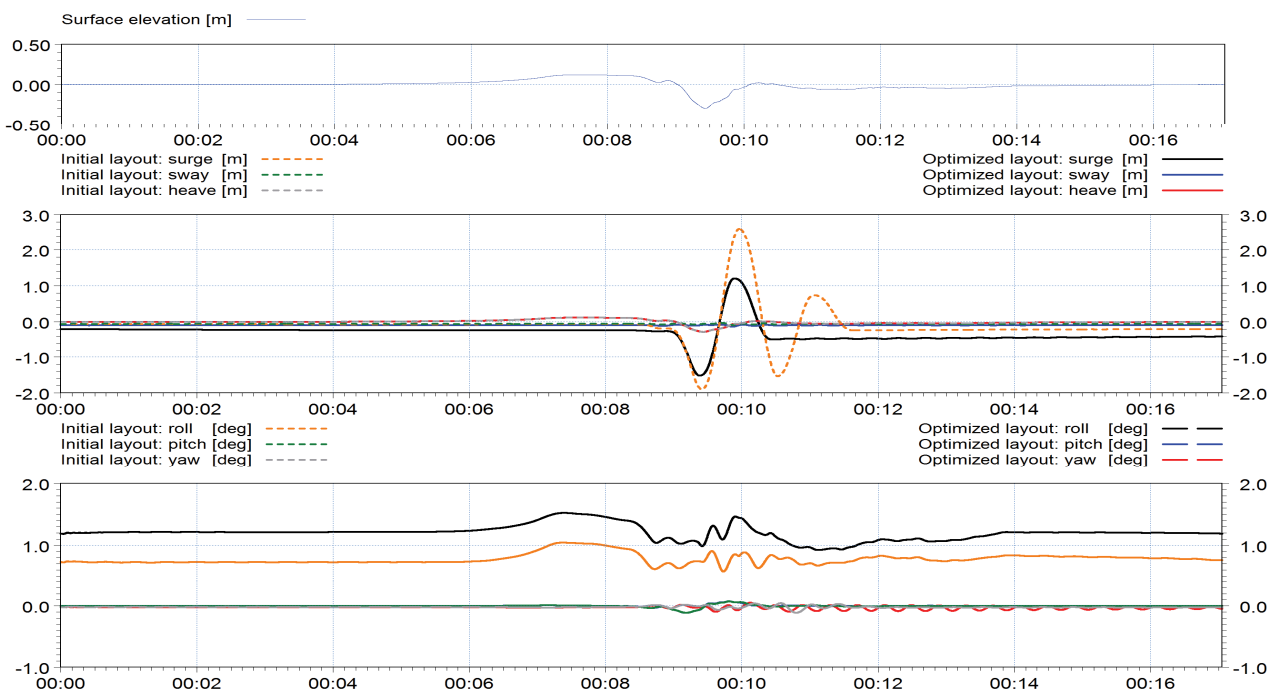


Abbildung 14: Wasserspiegelauslenkung (oben) und Schiffsbewegungen (mittig: Translationen; unten: Rotationen)

Anzahl	Position	Initiales Vertäulayout	Optimiertes Vertäulayout
		Max. Kraft [kN]	Max. Kraft [kN]
1	Heckleine	221	153
2	Heckleine	223	157
3	Achterspring	258	203
4	Achterspring	251	199
5	Vorspring	258	175
6	Vorspring	291	170
7	Bugleine	173	150
8	Bugleine	172	150
9	Achterquerleine *)	-	157
10	Achterspring *)	-	183
11	Vorspring *)	-	183
12	Vordere Querleine *)	-	114

*) Vorspannung mit landseitigem Vertäusystem

Tabelle 6: Maximalkraft pro Trosse verglichen mit der max. zulässigen Kraft (0.50*MBL = 240 kN).

Bei dem ursprünglichen Vertäuungskonzept traten Längsbewegungen von bis zu +2,5m auf, während die anderen Bewegungen relativ gering ausfielen. Um dies zu optimieren, wurden weitere uferseitige vorgespannte Festmacher eingesetzt, um die Bewegungen zu reduzieren. Die durchgezogene schwarze Linie zeigt, dass die Längsbewegung bei der optimierten Vertäuung signifikant, auf bis zu +1,2 m abnahm. Der leichte Anstieg der Rollbewegung (circa 0,5°) ist für die resultierenden Trossenkraft vernachlässigbar.

Aufgrund des Einsatzes von Springleinen zur Vermeidung von exzessiven Längsbewegungen, ist an dieser Stelle eine große Last für die initiale Vertäuung zu erwarten.

Die OCIMF empfiehlt einen Sicherheitsfaktor zu verwenden, der die maximal zulässige Kraft der Trossen für deren Lebenszyklus beschreibt. Deren Größe basiert auf einer abgeminderten minimalen Bruchlast (MBL), die explizit für jeden Festmacher definiert ist. Für verschiedene Materialien werden folgende Abminderungswerte empfohlen (OCIMF, 2008):

- Stahldraht: 55% MBL
- Synthetische Leinen: 50% MBL
- Polyamide: 45% MBL

Im Falle einer Überschreitung der max. zulässigen Trossenkraft sind die Ergebnisse rot markiert.

4.3 Zusammenfassung

In Tabelle 7 sind die maximal auftretenden Trossenkraft zusammengefasst. Zusätzlich werden dort die entsprechenden Auslastungsraten des jeweils beanspruchten Festmachertypes dargestellt. Das Ergebnis zeigt, dass für einige Fälle zusätzliche Leinen notwendig sind, um die durch das vorbeifahrende Schiff erzeugten Kräfte zu kompensieren. Das Frachtschiff, sowie eines der Jack-Up Schiffe wurden optimiert, um die gegebenen Toleranzen einzuhalten.

Die maximalen, absoluten Schiffsbewegungen in den Simulationen wurden für die einzelnen untersuchten Szenarios tabellarisch zusammengefasst. Als Referenz dienen die von der PANIC Working Group no. 24 empfohlenen und veröffentlichten, maximal zulässigen Schiffsbewegungen beim Be- und Entladen für allgemeine Frachtschiffe (PIANC, 1995). Diese basieren auf Erfahrungen, sowie Untersuchungen, und stellen einen guten Anhaltswert für verschiedene Schiffstypen dar. Tabelle 8 zeigt die maximalen Bewegungen, die in den Simulationen ermittelt wurden. Rote Zahlen kennzeichnen eine Überschreitung der von der PIANC empfohlenen Werte.

Generell ist festzuhalten, dass die Modellergebnisse zumeist unter dem empfohlenen Wert liegen. Dennoch gab es einige kritische Fälle, z.B. das Frachtschiff P2-800, welches trotz dem optimiertem Vertäulayout mit ShoreTension keine akzeptablen Wert für die maximale Längsbewegung erreichen konnte. In diesem Fall wurde der empfohlene Wert von maximal 2,0 m Längsbewegung um 36% überschritten. Es muss an dieser Stelle festgehalten werden, dass dieses Ereignis nur sehr selten auftritt und in einem solchen Fall die Beladung für die Dauer dieser Schiffpassage kurz unterbrochen werden kann.

Die Überschreitung von Längsbewegungen wird für beide Jack-up Schiffe eine untergeordnete Rolle spielen, da diese den Ladevorgang voraussichtlich nur in einer gejacketen Position durchführen werden.

Schiffstyp	MBL [kN]	abgeminderte MBL [kN]	Max. Kraft [kN]	Auslastungsrate
Frachtschiff P2-Klasse (8 Trossen)	480	240	291	121%
Frachtschiff P2-Klasse (8 + 4 Trossen *)	480	240	203	85%
Ponton (balastiert)	990	495	144	29%
Ponton (beladen)	990	495	280	57%
Jack-up Schiff 1 (6 Trossen)	512	230	263	114%
Jack-up Schiff 1 (6 Trossen + 2x Springs)	512	230	180	78%
Jack-up Schiff 2 (12 Trossen)	850	425	277	65%

*) Vorspannung mit landseitigem Vertäusystem

Tabelle 7: Maximale Kräfte pro Trosse. Absolutwerte während der dynamischen Lastberechnung.

Schiffstyp	Wogen [m]	Schwoien [m]	Tauchen [m]	Rollen [°]	Stampfen [°]	Gieren [°]
Frachtschiff P2-Klasse (8 Trossen)	4,49	0,06	0,40	1,62	0,19	0,16
Frachtschiff P2-Klasse (8 + 4 Trossen *)	2,72	0,05	0,40	0,60	0,19	0,14
Ponton (balastiert)	0,19	0,03	0,39	0,11	0,18	0,08
Ponton (beladen)	0,94	0,17	0,41	0,34	0,20	0,51
Jack-up Schiff 1 (6 Trossen)	2,40	0,12	0,40	0,21	0,21	0,40
Jack-up Schiff 1 (6 Trossen + 2x Springs)	1,58	0,12	0,40	0,13	0,19	0,32
Jack-up Schiff 2 (12 Trossen)	0,94	0,17	0,39	0,22	0,20	0,14

Tabelle 8: Maximalbewegungen. Absolutwerte der untersuchten Schiffsbewegungssimulationen.

5. Fazit

Die Studie befasste sich mit folgender zentralen Frage des Genehmigungsverfahrens: Können passierende Schiffe das Offshore Terminal Bremerhaven mit der erforderlichen uneingeschränkten Manövriergeschwindigkeit passieren, ohne die dort vertäuten Schiffe zu gefährden?

Dieses lässt sich wie folgt beantworten: Mit Hilfe einer geringfügig verbesserten (und teilweise landseitig vorgespannten) Vertäuerung sind alle untersuchten Schiffe in der Lage, den Kräften des „Worst Case Szenarios“ eines passierenden Schiffes standzuhalten. Des Weiteren wurden die im Fender System auftretenden dynamischen Lasten infolge der rapiden Schiffsbewegungen analysiert und als unkritisch befunden. Zur Sicherung des operativen Betriebes, sollte eine kurzzeitige Unterbrechung des laufenden Ladeprozesses in einigen Fällen aufgrund von hohen Schiffslängsbewegungen erwägt werden.

Abschließend ist hinzuzufügen, dass detaillierte Wind-einflüsse nicht mit analysiert wurden, da Be- und Entladevorgänge für gewöhnlich nicht in Zeitfenstern mit extremen Wetterlagen durchgeführt werden. Gleichwohl verfügt die angesetzte Widerstandskraft der Festmacherleinen noch über erhebliche Reserven, welche das Ergebnis dieser Studie - die sichere Vertäumöglichkeit - weiter bekräftigen.

Danksagung

Die Autorin dankt bremenports GmbH & Co. KG für die Erlaubnis, diese Fallstudie einem größeren Publikum präsentieren zu dürfen. Des Weiteren dankt sie allen involvierten Reedereien, Schiffsbetreiber und Werften, welche dieses Projekt mit relevanten Informationen unterstützt haben.

Literatur

BAW (2006), Fahrrinnenanpassung der Unterweser, Gutachten zur ausbaubedingten Änderung schiffserzeugter Belastungen, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg.

BAW (2006b), Naturmessungen zur schiffserzeugten Belastung der Unterweser, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg.

Briggs, M. J. (2006), Ship Squat Predictions for Ship/Tow Simulator, Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note ERDC/CHL CHETN-I-72. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.

Christensen, E.D., Mortensen, S.B., Jensen, B., Hansen, H.F., Kirkegaard, J. (2008), Numerical simulation of ship motion in offshore and harbour areas. Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE 2008, June 15-20, 2008, Estoril, Portugal.

DHI (2014), MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM Hydrodynamic and Transport Module – Scientific Documentation, MIKE by DHI, Hørsholm.

Morgenstern, H. von (2011), Simulations-Studie Offshore Terminal Bremerhaven, Abschlussbericht, Bremen.

Mortensen, S.B., Alley, C., Kirkegaard, J., Hancock, R. (2009), Numerical modelling of moored vessel motions caused by passing vessels, Proceedings of Coasts & Ports 2009, pp. 544, Wellington, New Zealand.

OCIMF (2008), Mooring Equipment Guidelines” 3rd MEG3 Edition.

PIANC (1995), Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours, A practical Guide, Supplement to Bulletin No 88, PIANC.

PIANC (2002), Guideline for the Design of Fenders Systems.

WAMIT (2011), WAMIT User Manual 7.0, WAMIT Inc.

Wuebben, J.L. (1995), Winter Navigation on the Great Lakes, A Review of Environmental Studies, CRRL Report.

Verfasser

Dipl.-Ing. Anja Brüning

DHI

Agern Allé 5

2970 Hørsholm, Denmark

E-Mail: abu@dhigroup.com

Dr. Oliver Stoscchek

DHI-WASY GmbH

Max-Planck-Straße 6

28857 Syke, Germany

Tel.: 04242/1638-18

E-Mail: ost@dhigroup.com

Dipl.-Ing. Dominic Spinneker

DHI-WASY GmbH

Max-Planck-Straße 6

28857 Syke, Germany

Tel.: 04242/1638-0

Dipl.-Ing. Ulrich Kraus

bremenports GmbH & Co.KG

Am Strom 2

27568 Bremerhaven, Germany

Tel.: 0471/30901 - 547

E-Mail: ulrich.kraus@bremenports.de

PIANC Arbeitsgruppe 155: Schiffsverhalten in Schleusen und Schleusenvorhöfen

Dr.-Ing. Carsten Thorenz

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

D. Bousmar, J.-P. Dubbelman, Li Jun, D. Spitzer, J. J. Veldman, J. R. Augustijn, W. Kortlever, A. Hartley, A. Moreno, R. Salas, J. Wong, M. Vantorre, O. Weiler, P. Hunter, S. Roux, Wu Peng

Zusammenfassung

Ziel der PIANC Arbeitsgruppe 155 „Schiffsverhalten in Schleusen und Schleusenvorhöfen (Ausschuss für Binnenschifffahrt, InCom) ist es, Planern und Betreibern von Schleusen einen größeren Einblick in die Schwierigkeiten zu geben, die durch die Interaktion von Schiff und Schleuse auftreten können und mögliche Gegenmaßnahmen aufzuzeigen. Während des Schleusungsprozesses, aber auch während der Fahrt auf freier Strecke können Schiffe erheblich durch die von Schleusen ausgelösten Prozesse beeinflusst werden. Da die Planung und der Betrieb von Schleusen stark durch die hier ablaufenden physikalischen Prozesse beeinflusst werden, ist es wichtig ein Verständnis für die zugrunde liegende Physik zu entwickeln. In dem von der Arbeitsgruppe verfassten Abschlussbericht werden die wichtigsten Prozesse vorgestellt und anhand aktueller und abgeschlossener Schleusenprojekte erläutert. Die vorliegende Abhandlung gibt einen Einblick in die Arbeit der Gruppe und in die wichtigsten Themen des Berichts.

1. Einleitung

Ein wesentliches Ziel der PIANC ist die Förderung des Wissensaustauschs zwischen Personen, die sich mit Schifffahrt und Wasserstraßen beschäftigen. Um dieses Ziel zu erreichen bringt PIANC internationale Experten für Planung, Entwicklung und Unterhaltung von Häfen, Wasserwegen und Küstengebieten zusammen. In Arbeitsgruppen werden technische Verbesserungen für standardisierte Anwendungen entwickelt.

Die vorliegende Abhandlung gibt einen Einblick in die Arbeit der PIANC Arbeitsgruppe 155. Sie wurde 2011 gegründet und umfasst momentan 14 Experten und vier „young professionals“ aus neun verschiedenen Ländern (Bild 1). Ihr Vorgänger ist die Arbeitsgruppe 29, die 2009 den Bericht Nr. 106 „Innovations in navigation lock design“ veröffentlichte (PIANC, 2009). Bei den Vorbereitungen dieses Berichts, der sich hauptsächlich auf die Planung von Schleusen konzentriert, stellte sich heraus, dass es nötig ist Planern und Betreibern von Schleusen einen größeren Einblick in die Schwierigkeiten zu geben, die bei der Interaktion von Schiff und Schleuse auftreten können und mögliche Gegenmaßnahmen aufzuzeigen.

Während des Schleusendurchgangs und der freien Fahrt können Schiffe erheblich durch die von Schleusen ausgelösten Prozesse beeinflusst werden. Da die Planung und der Betrieb von Schleusen stark durch die hierbei ablaufenden physikalischen Prozesse beeinflusst werden, ist es wichtig ein Verständnis für die zu Grunde liegende Physik zu entwickeln. Das Ziel der

Arbeitsgruppe ist es Planern und Betreibern einen tieferen Einblick in die Relevanz der Einflüsse von Schleusen auf Schiffe zu geben und diese anhand aktueller Schleusenprojekte zu erläutern.



Bild 1: Arbeitsgruppe 155 vor dem Wasserbaulabor der Compagnie Nationale du Rhône (CNR) während des Treffens in Lyon

2. Treffen der Arbeitsgruppe

2.1 Einleitung

Nach der einführenden Kick-Off Veranstaltung in New Orleans im September 2011 (verbunden mit der PIANC Smart-Rivers Conference) folgten weitere Veranstaltungen in Delft, Lyon, Panama City und Maastricht mit folgendem Ablauf: Jedes Treffen bestand aus drei Arbeitseinheiten über je einen halben Tag und zwei oder drei anschließenden technischen Besichtigungstouren. Diese Art von Treffen ist vorteilhaft, da sie den intensiven Austausch zwischen den Gruppenmitgliedern fördern.

2.2 Einführungsveranstaltung in New Orleans

Die Arbeitsgruppe traf sich zum ersten Mal am 12. September 2011 in New Orleans zu einer eintägigen Veranstaltung. Ein wichtiger Teil des Treffens waren Präsentationen der einzelnen Mitglieder zu ihrem fachlichen Hintergrund, wie zum Beispiel relevante Punkte des Lebenslaufs, Arbeitgeber und wichtige Projekte an denen sie gearbeitet haben. Die Gruppe erarbeitete und analysierte die Zielvorgaben für einen späteren Bericht. Diese eigneten sich aber nicht direkt als Leitfaden für die Strukturierung des Berichts. Es wurden deshalb zwei Möglichkeiten erarbeitet den Bericht zu gliedern.

Der erste Ansatz orientierte sich an dem Blickwinkel eines Nutzers der Infrastruktur. Er basiert auf einer Chronologie von Ereignissen, die für ein Schiff bei einer Schleusung von Bedeutung sind. Daraus resultieren separate Kapitel für das Verlassen der freien Fahrt, das Warten vor dem Schleusentor, das Einfahren in die Schleuse, das Festmachen, den Schleusungsprozess, das Verlassen der Schleuse und das Zurückkehren zur freien Fahrt.

Alternativ wurde ein zweiter, wissenschaftlich orientierter Ansatz entwickelt, der auf einer Folge von Konse-

quenzen beruht. Die Kapitel sollten Methoden zur Berechnung bzw. Abschätzung der Schiffskräfte, der daraus resultierenden Reaktionen des Schiffs und der sich daraus ergebenden Handhabung des Schiffs durch die Schiffsbesatzung wie z.B. beim Anlegen etc. beschreiben. Außerdem sollte das vorliegende Maß an Sicherheit basierend auf dem Verhalten des Schiffs und dessen Ausrüstung abgeschätzt werden. Durch diese Analyse der Prozesse sollten abschließend Richtlinien entwickelt werden.

Es wurde beschlossen den ersten Ansatz weiterzuentwickeln, da er einen größeren praktischen Nutzen für den Anwender des Berichts bietet. Sich wiederholende Stellen, die die gleichen physikalischen Grundlagen in unterschiedlichen Phasen des Schleusungsprozesses beschreiben, wurden als großes Problem beider Ansätze identifiziert.

2.3 Treffen in Delft

Im Februar 2012 traf sich die Arbeitsgruppe in Delft, Niederlande. Der Gastgeber des Treffens war Deltares. Nach einer Führung durch die Wasserbaulabore von Deltares diskutierte die Gruppe über Präsentationen der Mitglieder mit folgenden Themen:

- Experimentelle/Numerische Methoden zur Berechnung von Schiffskräften während der Schleusung
- Erfahrungen von Schiffsführern mit Schleusungen (Ausrüstung, Probleme, etc.)
- Chinesische Richtlinien zur Berechnung von Schiffskräften
- Relevanz von Fendern
- Freizeitschiffahrt in Schleusen
- Poller (Form, Belastungsannahmen, etc.)
- Physikalischer Hintergrund von Kräften auf sich bewegende Schiffe

Als dritte mögliche Berichtstruktur wurde eine Aufteilung in zwei Themenbereiche vorgeschlagen: „Navigation“ (horizontale Bewegung des Schiffs) und „Schleusung“ (vertikale Bewegung des Schiffs). Aufgrund der Präsentationen und Diskussion der Gliederung des Berichts bei vorherigen Treffen, entschied man sich allerdings für den erstgenannten Ansatz eines chronologischen Ablaufs aus dem Blickwinkel des Nutzers. Der Aufbau der Kapitel wurde von zwei Teilnehmergruppen erarbeitet. Eine Gruppe befasste sich mit den Vorgängen „außerhalb der Schleuse“, die andere mit den Vorgängen „innerhalb der Schleuse“. Da das nächste Ziel das Füllen der Kapitelstruktur mit wissenschaftlichem Inhalt war, wurden Aufgaben zur Erarbeitung zukünftiger Beiträge an die Teilnehmer verteilt. Obwohl zu diesem Zeitpunkt bereits eine bemerkenswerte Menge an inhaltlichem Material gesammelt und in das Manuskript integriert wurde, standen immer noch wesentliche Schreibarbeiten bevor.

Die Besichtigungen der Schleusen IJmuiden und der Schleusenkomplexe Volkerak und Krammer vervollständigten das Treffen. Die Teilnehmer hatten die Möglichkeit das sehr spezielle Füllsystem der Krammer-Schleusen zu besichtigen, an der das Eindringen von Salzwasser ein besonderes Problem darstellt. An den Seeschleusen von IJmuiden gaben die Lotsen einen Einblick in ihre Erfahrungen mit dichtebedingten Strö-

mungen, die hier beobachtet werden konnten. Bild 2 zeigt wie Süßwasser oberflächennah aus der Kammer fließt während das dichtere Salzwasser darunter in die Kammer strömt. Diese Situation birgt große Gefahren, da „das was man (als Schiff) fühlt, nicht das ist was man (als Kapitän) sieht“.



Bild 2: Oberflächennahe Ausbreitung der Frischwasserfahne nach der Öffnung des Schleusentores bei IJmuiden, Niederlande

2.4 Treffen in Lyon

Im September 2012 traf sich die Arbeitsgruppe in Lyon, Frankreich (Bild 1). Der Gastgeber dieses Treffens war die Compagnie Nationale du Rhône (CNR), wodurch sich die Möglichkeit bot das physische Modell der Panamakanal-Schleusen zu besichtigen, das in den Wasserbaulaboren der CNR aufgebaut ist. Während des Treffens besprach die Gruppe kapitelweise den Status der Arbeiten am Bericht. Die zuvor festgelegte Gliederung des Berichts wurde erneut diskutiert, letztendlich aber als das geringere Übel angenommen. Das Ziel des Berichts ist eine Sammlung von Wissen über Schiffskräfte und das daraus resultierende Verhalten, die Planern und Betreibern hilft sich auf die wichtigsten Geschehnisse an einer Schleuse zu konzentrieren. Im Unterschied zu anderen Berichten hat die Gruppe eine Einleitung im erzählerischen Stil geschrieben, um einen anregenden Einstieg in das vielleicht trockene Thema zu ermöglichen. Durch einen Besuch des Rhône Navigation Centres, der Schleuse Châteauneuf und einer Tiefenmessung auf der Rhône wurde das Treffen abge-

rundet. An der Schleuse Châteauneuf konnte ein Schiff beobachtet werden, das offensichtlich Probleme hatte, gegen den Kolbeneffekt anzukämpfen, der detailliert in dem kommenden Bericht beschrieben wird. Die Ausfahrt aus der Schleuse dauerte fast 15 Minuten (Bild 3).



Bild 3: Schiff bei der Ausfahrt aus der Schleuse Châteauneuf

2.5 Treffen in Panama City

Die Panama Canal Authority (ACP) und die International Maritime Pilots Association (IMPA) waren Gastgeber des Treffens der Arbeitsgruppe im März 2013 in Panama. Während des Treffens wurde beschlossen, Teile der Arbeit in einem Workshop bei der nächsten Smart-Rivers-Conference 2013 zu präsentieren. Der Workshop wurde als kleines Symposium zur Arbeit der Gruppe und anderen interessanten Themen über Schleusen geplant. Außerdem wurde neues Material, das in der Zeitspanne zwischen dem letzten Berichtsentwurf und dem Treffen in Panama City erarbeitet wurde, der Gruppe zur Verfügung gestellt, geprüft und in den Bericht integriert. Zum Aufstellen einer Gefahrenanalyse (HAZOP) wurde das Treffen mit einem Brainstorming über mögliche Gefahren während einer Schleusendurchfahrt abgeschlossen. Die begleitenden technischen Touren gaben einen tiefgehenden Einblick in das Panama-Canal-Expansion-Programm und die bestehenden Schleusen (Bild 4). Der Besuch der Baustelle der dritten Schleusen und die technische Tour zu den Baggerbereichen bei Gamboa und Culebra Cut zeigten die enorme Größe der anstehenden Arbeiten. Besichtigungen des Kontrollzentrums für marinen Schiffsverkehr (Marine-Traffic-Control-Centres) und des Schiffsführungssimulators der ACP ergänzten die technische Tour.



Bild 4: Arbeitsgruppe 155 und Gäste bei der Besichtigung der alten Panamakanal-Schleusen

2.6 Treffen und Workshop in Liege/Maastricht

Im September 2013 traf sich die Arbeitsgruppe in Maastricht, Niederlande. Während des Treffens entschied die Gruppe, dass der Bericht inzwischen einen Status innehatte, der als „fast fertig“ bezeichnet werden konnte. Für die abschließenden Arbeiten wurde die Verantwortung für die Fertigstellung der einzelnen Kapitel an einzelne Mitglieder der Arbeitsgruppe vergeben. Man entschied sich auf einige weitere Beiträge zu warten und einen Entwurf des Berichts an ein US-amerikanisches Mitglied von PIANC (da kein US-amerikanisches Mitglied aktiv in Arbeitsgruppe 155 mitarbeitete) und InCom zu senden. Aufgrund von Krankheit und anderweitiger Arbeitsbelastung mancher Mitglieder konnte der Zeitplan nicht eingehalten werden, weshalb ein größerer Entwurf des Berichts zur Korrektur versendet wurde. Momentan ist die interne Korrektur durch die Verantwortlichen der einzelnen Kapitel in Gange. Voraussichtlich ist kein weiteres Treffen von Nöten, um den Bericht abzuschließen.

Der von der Arbeitsgruppe 155 veranstaltete Schleusen Workshop auf der Smart-Rivers Conference 2013 hat erfolgreich dazu beigetragen, die Arbeit der Gruppe vorzustellen. Mit mehr als 40 Zuhörern kam es zu regen Diskussionen unter den anwesenden Experten (Bild 5).



Bild 5: Eindrücke des Schleusen Workshops auf der Smart-Rivers Conference 2013

3. Identifizierte relevante Interaktionen zwischen Schiff und Schleuse

3.1 Einleitung

Die Bewegung eines Schiffes während der Annäherung an eine Schleuse und der Durchquerung derselben wird von vielfältigen Faktoren beeinflusst. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über einige der im Bericht dazu enthaltenen Themen gegeben. Natürlich können in diesem Rahmen nur kleine Ausschnitte präsentiert werden, während die vollständige Darstellung dem in Arbeit befindlichen Bericht vorbehalten ist.

3.2 Während der freien Fahrt

Beim Füllen einer Schleusenkammer wird Wasser aus dem Oberwasser entnommen, wodurch eine Sunkwelle im oberen Einflussbereich der Schleuse entsteht. Entsprechendes gilt für die Entleerung einer Schleusenkammer in das Unterwasser. Hier entsteht eine Schwallwelle im unteren Einflussbereich der Schleuse. Sind die Schwall- und Sunkwellen zu groß, kann die Schifffahrt beeinträchtigt werden:

- Schiffe könnten an Brücken stoßen (Schwallwelle) oder den Grund berühren (Sunkwelle)
- Durch den zusätzlichen Volumenstrom entstehen Fließgeschwindigkeiten, die Schiffe bei der Schleuseneinfahrt oder beim Aufstoppen beeinflussen könnten
- Zusätzliche Kräfte entstehen zwischen den Leichtern eines Schubverbandes

Neben diesen für die Schiffsführung relevanten Einflüssen kann es zu weiteren Nebenerscheinungen kommen:

- Benachbarte hydraulische Anlagen können beeinflusst werden: zusätzliche Kräfte auf Schleusentore, Auswirkungen auf Kontrollsysteme von Wehren durch plötzliche Wasserspiegelschwankungen, zusätzlicher Ballast im Trog eines Schiffhebewerks

- Da die Wellenlänge von Schwall- und Sunkerscheinungen deutlich länger ist als die von schiffsgenerierten Wellen, erhöht sich die Zeit des Trockenfallens bzw. der Überflutung der Ufer, wodurch das Ökosystem des Ufers gestört werden kann.

In diesen Kapiteln des Berichts werden die relevanten physikalischen Grundlagen eines Schiffes in Fahrt und das Verhalten von schleuseninduzierten Schwall- und Sunkwellen erklärt. Die Entstehung und Ausbreitung der Wellen werden ebenso erläutert wie die Formänderung bei der Bewegung durch die Wasserstraße. Da die Amplitude der entstehenden Welle innerhalb akzeptabler Grenzen liegen muss, werden Richtlinien verschiedener Länder zu erlaubten Wellenhöhen angegeben und Beispiele beobachteter schleuseninduzierter Wellen aufgezeigt.

Des Weiteren wird der Einfluss von Querströmungen im Vorhafen aufgezeigt, die durch einen angrenzenden Fluss ausgelöst werden. Obwohl nicht Schwerpunkt des Berichts, werden außerdem Empfehlungen für die räumlichen Ausmaße des Vorhafens gegeben, um das Einfahren in die Schleuse für die Schifffahrt sicher zu gestalten.

3.3 Im Vorhafen

Der Vorhafen kann als Verbindung zwischen der freien Fahrt auf dem Kanal/Fluss und der Schleusenkammer gesehen werden. In diesem Bereich muss ein Schiff, das in die Schleuse einfahren möchte, die Geschwindigkeit auf ein angemessenes Maß drosseln, welches sehr viel tiefer liegt als die reguläre Schiffsgeschwindigkeit. Die Reduktion der Geschwindigkeit erfordert eine verringerte Propellerleistung und hat erhebliche Konsequenzen für die Manövrier- und Steuerbarkeit. Die Ruderkräfte sind proportional zum Quadrat der Anströmgeschwindigkeit. Diese wiederum hängt von der Relativgeschwindigkeit des Schiffes im Wasser und der momentanen Leistung des Propellers ab. Beide werden bei der Einfahrt in den Vorhafen reduziert. Daher sind externe Kräfte aus Wind, Strömung und wechselseitiger Beeinflussung etc. bei niedrigen Geschwindigkeiten sehr viel schwieriger zu kompensieren. Unter diesen Bedingungen ist es teilweise nötig zu anderen Mitteln der Schiffssteuerung zu greifen, wie Heck- und Bugstrahlruder oder externe Hilfsmittel wie Schlepper oder Verholleinen.

Neben der Funktion als Verbindungsglied zwischen Schleuse und Kanal wird der Vorhafen auch als Wartebereich genutzt, in dem Schiffe bis zum Freiwerden der Schleuse oder der Schifffahrtsstraße liegen können. Beide Funktionen und die zugehörigen Probleme werden in diesem Kapitel diskutiert. Die Präsenz veräuteter Schiffe im Vorhafen ist besonders in der Binnenschifffahrt, aber auch in der Nähe von Schleusen der Hochseeschifffahrt, nicht ungewöhnlich. Schiffe brauchen einen sicheren Liegeplatz, falls eine Weiterfahrt nicht möglich ist, insbesondere dann, wenn auf die Freigabe zur Schleusung gewartet werden muss oder priorisierte Schiffe anwesend sind.

Strömungen im Vorhafen können für langsam fahrende Schiffe, die zum Beispiel in die Schleuse einfahren, störend oder sogar gefährlich werden. Bild 6 zeigt den Einfluss einer durchbrochenen Trennmole, die das

Strömungsfeld im Vorhafen signifikant beeinflussen kann. In Bild 7 ist das numerische Strömungsfeld einer Schleusenkamerernteuerung dargestellt. Der entstehende Volumenstrom hat einen negativen Einfluss auf Schiffe, die in die Nachbarkammer einfahren. Zusätzlich werden weitere Ursachen externer Kräfte erklärt und relevante Richtwerte angegeben, wie zum Beispiel für den Durchfluss von Wasserkraftwerken (Bild 8). Da die Wassertiefe im Vorhafen mit der wichtigste Faktor für die Manövrierbarkeit von Schiffen ist, werden Richtwerte aus verschiedenen Ländern angegeben.

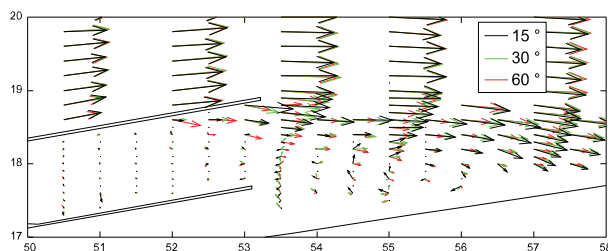


Bild 6: Einfluss einer durchbrochenen Trennmole zwischen Vorhafen und Fluss

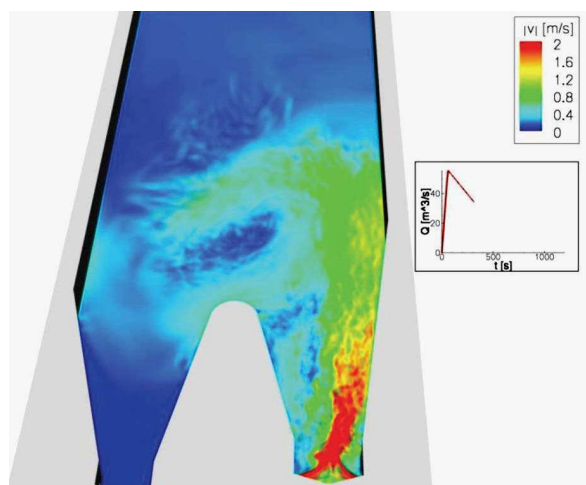


Bild 7: Wirbelbildung im Vorhafen einer Doppelschleuse

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Wechselwirkung des schiffsinduzierten Strömungsfelds mit den umgebenden Strukturen. Bei ufernaher Fahrt werden durch den sogenannten „Bank-Effekt“ Kräfte und Impulse übertragen, die das Schiff an das Ufer ziehen. Dieser Effekt wird detailliert mit Beispielen erklärt und mögliche Vermeidungsstrategien gegeben.

Um ein Schiff im Vorhafen zu stoppen ist ein gewisses Maß an Raum nötig. Das Stoppen kleiner und mittlerer Schiffe stellt in der Regel kein größeres Problem dar, da die meisten dieser Schiffe aus eigener Kraft zum Halten kommen. Leider ist es gängige Praxis, dass kleinere Binnenschiffe unter Verwendung ihrer Festmacherleinen stoppen. Dieses Verfahren birgt große Gefahren, da die Lasten auf die Festmacherleinen sehr groß werden können. Größere Schiffe drosseln ihre Geschwindigkeit selbstständig (auf ungefähr 5 bis 6 Knoten) bis ein Festmachen von Schleppern gefahrlos möglich ist. Es werden Beispiele zur Handhabung von großen Schiffen durch Schlepper gegeben.

Vertäute Schiffe können auf verschieden Weisen durch schiffs- oder schleuseninduzierte Wellen gefährdet werden:

- Grundberührung durch sehr große vertikale Bewegungen
- Berührung der Anlegestelle oder Dalbe, hauptsächlich durch Rollen
- Reißen der Leinen durch horizontale Bewegungen

Die erlaubten Grenzen der Schiffsbewegung zur Sicherstellung eines gefahrlosen Zustands hängen immer von dem Schiff sowie dem verwendeten Stoßschutz und Festmachsystem ab. Im Vorhafen von Binnenschleusen vorbeifahrende Schiffe stellen auf Grund ihrer gedrosselten Geschwindigkeit meist keine Gefahr dar. Die größten Kräfte werden dort durch schleuseninduzierte Wasserspiegelgefälle und daraus resultierende Fließgeschwindigkeiten erzeugt. Im Bericht werden Gleichungen zur Berechnung von Kräften durch Wellen angegeben und die Anforderungen verschiedener Länder an die Festmacherausrüstung genannt.

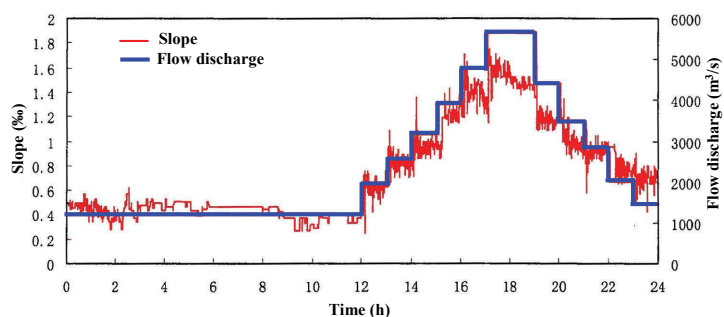


Bild 8: Gemessener Kraftwerksdurchfluss und resultierende Wasserspiegelneigung

3.3 Einfahrt in die Schleuse

Mehrere Faktoren bestimmen die Sicherheit bei der Einfahrt in die Schleuse. Zum Beispiel kann der Einfluss dichtebedingter Strömungen bei der Einfahrt signifikant sein. Besonders bei tiefen Seeschleusen am Übergang von Salz- zu Süßwasser können Dichteunterschiede bedeutende Strömungen herbeiführen (vgl. Bild 2). Typisch für eine Dichteströmung ist eine Süßwasserströmung an der Oberfläche und eine entgegengesetzt gerichtete Salzwasserströmung am Boden. Die Dichteströmungen, deren Stärke von der Salzgehaltsdifferenz zwischen Ober- und Unterwasser und der Öffnungsgeschwindigkeit des Schleusentores abhängt, können große Kräfte auf das manövrierende Schiff und seine assistierenden Schlepper bei der Schleusenand- und -einfahrt ausüben.

Des Weiteren sind die Auswirkungen der Schiffsgeschwindigkeit auf das Einfahrmanöver von Bedeutung, weshalb diese aus Sicherheitsgründen in einem angemessenen Rahmen liegen sollte. Zumeist ist die Einfahrtsgeschwindigkeit an Schleusen mit großer Breite und für entladene Schiffe höher. Die Einfahrtsgeschwindigkeit des Schiffs wird durch den großen Widerstand des beengten Profils begrenzt. Alle Wasserbewegungen, die durch das Schiff ausgelöst werden, hängen stark von der Schiffsgeschwindigkeit, dem Verhältnis von Schiffs- zu Schleusenquerschnitt und dem Verhältnis von Tiefgang zu Wassertiefe ab. Als Folge der hohen Fließgeschwindigkeit des Wassers, das dem Schiff bei der Einfahrt entgegenströmt, sinkt der Wasserspiegel entlang des Schiffs. Als Resultat dieser Absenkung kann das Schiff weiter einsinken (Squat), mit der Gefahr

den Dremmel zu berühren. Es werden verschiedene Ansätze zur Bewertung dieser Effekte vorgestellt.

3.4 In der Schleuse - bei geöffneten Toren

Wellen aus dem Vorhafen können in die Schleusenkammer laufen und die dort vertäuten Schiffe in Bewegung bringen. Hierbei beeinflusst die Form der Schleuseneinfahrt die Veränderung der Wellenhöhen. Eine Trichterform kann kurze Wellen deutlich verstärken und so zu größeren Unruhe in der Kammer führen als ein plötzlicher Übergang.

Wenn ein Schiff in eine Schleuse einfährt, erzeugt es Flachwasserwellen, die am gegenüberliegenden geschlossenen Schleusentor reflektiert werden. Ein bereits in der Kammer liegendes Schiff kann durch diese Bugwelle in Bewegung gesetzt und auf das gegenüberliegende Haupt geschoben werden. Wenn die Schließung des Tores und der Festmachprozess starten, bevor die eingetragenen Wellen abflachen, können große Kräfte in den Festmacherleinen entstehen.

Eine weitere Ursache von Wellen ist die Bewegung des Tores. Aufgrund des großen Vorhafenquerschnitts spielt der Einfluss der erzeugten Wellen hier normalerweise keine Rolle, kann in der Kammer selbst aber zu Störungen des Schleusenbetriebs führen. Es gibt viele verschiedene Arten von Schleusentoren, die detailliert in den PIANC-Berichten über Schleusen beschrieben sind (PIANC 1986 und PIANC 2009). Manche der Schleusentore bewegen nur eine sehr kleine Menge an Wasser während des Betriebs (Sektoren, Hubtore), wohingegen Stemmtore deutlich größere Wassermengen bewegen. Der Betrieb von Stemmtoren hat einen plötzlichen Fluss an Wasser zur Folge, der allerdings nur für eine kurze Zeit anhält. Durch die sehr kurze Wellenlänge dieser Wellen werden größere Schiffe nicht beeinflusst. Im Gegensatz dazu können kleine Schiffe, die einen großen Teil des Kammerquerschnitts blockieren, unerwartet in Bewegung gesetzt werden.

Da Schiffe typischerweise bei geöffnetem Schleusentor festgemacht werden, beinhaltet das Kapitel „In der Schleuse - bei geöffneten Toren“ auch die Richtlinien für Pollerabstand und -bemessung. Außerdem wird auf die Wahl zwischen festen und beweglichen Pollern und Erfahrungen aus der Festmachpraxis eingegangen (Bild 9).



Bild 9: Synthetische Taue an Binnenschiffen

Im Bericht werden die Hauptursachen der in der Kammer auftretenden Wellen erläutert und Formeln zur Abschätzung der Schiffskräfte angegeben. Auch wenn die Amplituden der in der Kammer auftretenden Wellen oft klein sind, können die Auswirkungen auf Schiffe groß werden.

3.5 Schleusung

Der Schleusungsprozess selbst ist die kritischste Interaktion von Schleuse und Schiff. Daher werden alle relevanten Prozesse detailliert in diesem Teil des Berichts beschrieben.

Nachdem das Schiff in der Kammer festgemacht hat und die Tore geschlossen sind, kann der Schleusungsprozess beginnen. Die Schleusenkammer wird entweder über ein Vorkopfsystem (Bild 10) oder ein komplexes System aus Kanälen und Absperrorganen, angetrieben durch die Gravitation, gefüllt oder geleert. Da der Zu- bzw. Abfluss aus der Kammer Wellen und Schiffskräfte hervorruft, sind Füll- und Entleersystem sorgfältig auszuwählen und der Volumenstrom auf angemessene Werte zu begrenzen. Die resultierenden Kräfte müssen klein genug sein, um einen sicheren und komfortablen Betrieb zu gewährleisten.

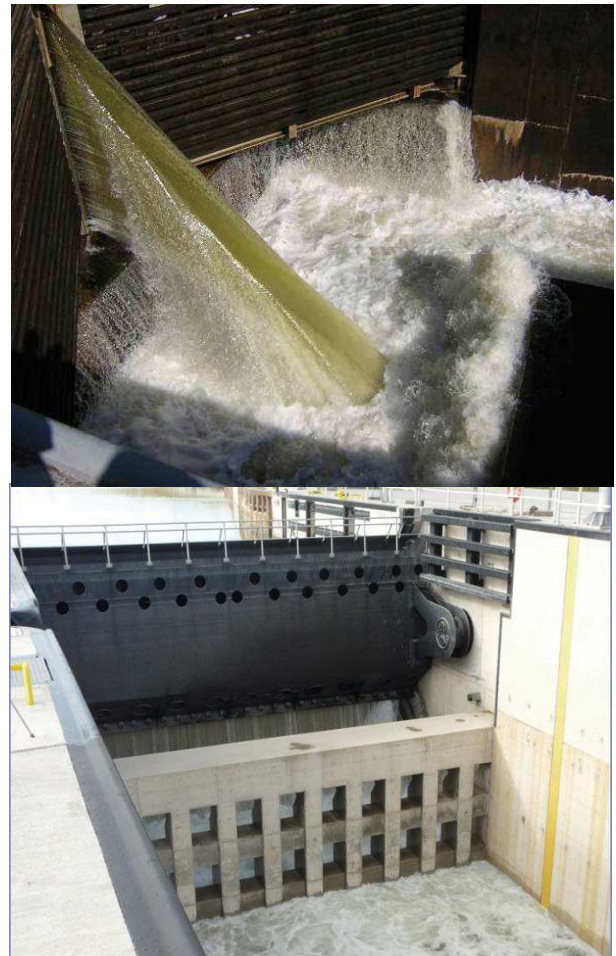


Bild 10: Sehr einfaches und hochentwickeltes Vorkopffüllsystem

Im Bericht wird ein Überblick über die am häufigsten verwendeten Füllsysteme gegeben. Außerdem werden die verschiedenen Ursachen von Kräften die während der Schleusung auftreten, zusammen mit Bewertungsmerkmalen für einen sicheren und komfortablen Betrieb aufgeführt. Danach werden die einzelnen Komponenten der Kräfte und damit verbundene physikalische Prozesse analysiert. Da Schützfahrpläne oft zu Problemen beim Schleusenbetrieb führen, werden deren Einflüsse erläutert. Bild 11 zeigt die Wasserspiegelneigung für ein schrittweise gezogenes Schütz, das aufgrund von Superpositionseffekten zu großen Wellen führt.

Abschließend werden die Vor- und Nachteile der möglichen Untersuchungsmethoden (numerische und physische Modelle, Feldmessungen) für den Schleusenfüllungs- und entleerungsprozess zusammengefasst. Zusammen mit den Richtlinien verschiedener Länder wird damit ein Überblick über die Schiffskräfte während der Schleusung und Möglichkeiten zur Beurteilung der Sicherheit gegeben.

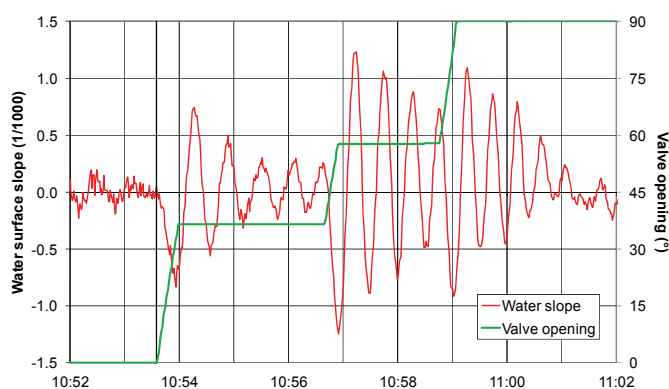


Bild 11: Auswirkung eines un stetigen Schützfahrplans auf die Wasserspiegelneigung

3.6 Verlassen der Schleuse

Nach dem Erreichen des Zielwasserspiegels wird das Schleusentor geöffnet. In der Regel beginnt die Öffnung des Tores, wenn Sensoren eine bestimmte Minimaldifferenz der Wasserspiegel innerhalb und außerhalb der Kammer messen. Da die Wasserspiegeldifferenz nie Null ist, wird beim Öffnen immer eine Welle erzeugt. Dieser Effekt ist weniger ausgeprägt, wenn das Tor langsam geöffnet wird. Neben der Erklärung dieses Prozesses wird in dem Bericht eine Faustregel zur Abschätzung einer akzeptablen Minimaldifferenz erläutert.

Beim Füllen der Schleuse kann es zum Über- oder Unterschwingen des Wasserspiegels kommen, besonders dann, wenn das Füllsystem aus langen Kanälen besteht. In diesem Fall hat das Wasser in den Kanälen einen so großen Impuls, dass der Wasserspiegel in der Kammer über den Oberwasserspiegel steigt bzw. unter den Unterwasserspiegel sinkt. Um ein Überschwingen zu verhindern, ist der Schützfahrplan sorgfältig anzupassen. Dies kann erreicht werden, indem das Schütz geschlossen wird, bevor der Füll- bzw. Entleervorgang abgeschlossen ist. Andernfalls kann das Ausspiegeln sehr viel länger dauern (bis die Wellen abgeflacht sind) oder die Schiffskräfte groß werden (wenn das Tor im

falschen Moment geöffnet wird, zum Beispiel beim Auftreten des Maximums des Überschwingers).

Aufgrund des großen Widerstands des beengten Kammerquerschnitts beschleunigt ein die Schleusenammer verlassendes Schiff langsam und sinkt dabei ein (Entwicklung eines Squats). Das vom Bug verdrängte Wasser fließt sehr leicht aus dem geöffneten Schleusentor, allerdings nur mit Widerstand durch den sehr viel kleineren Querschnitt in Richtung Heck. Während des Ausfahrens aus der Schleusenammer kann es zu Grundberührung kommen. Im Bericht werden Erfahrungswerte angegeben, um abschätzen zu können bis zu welcher Geschwindigkeit Schiffe gefahrlos aus der Kammer ausfahren können (vgl. Bild 3).

Die „hydraulische Assistenz“ dient dazu Schiffen das Ausfahren aus der Kammer ins Unterwasser zu erleichtern: Die Schütze am Obertor werden leicht geöffnet, so dass das Schiff aus der Schleuse gedrückt wird. Dieses Verfahren wird für Hochseeschiffe mit einem sehr hohen Blockadeverhältnis am Panamakanal angewandt. Es wurde ebenfalls an deutschen Binnenschleusen untersucht, kommt momentan aber nicht zur Anwendung. Die Vor- und Nachteile werden in dem Bericht der Arbeitsgruppe 155 erläutert.

3.7 Weitere Aspekte

In diesem Kapitel werden Punkte aufgeführt, keinem der anderen Kapitel eindeutig zuzuordnen sind. Themen sind Sicherheitsaspekte (eine HAZOP Analyse für Schleusendurchfahrten), die Verwendung von Fendern und die Frage nach dem Umgang mit der Freizeitschifffahrt.

4. Fazit

Die Arbeit von Arbeitsgruppe 155 war bereits von erheblichem indirektem Nutzen, da die unterschiedlichen Ansichten der Experten in Bezug auf bestimmte Themen den Horizont aller Teilnehmer erweiterten. Zusätzlich wurde die Öffentlichkeit durch den organisierten Workshop auf der Smart-Rivers Conference 2013 integriert. Der Workshop zeigte die Bandbreite an Themen, die von der Arbeitsgruppe abgedeckt wurde und gab der Öffentlichkeit die Möglichkeit mit der Arbeitsgruppe zu interagieren.

Während den Arbeitstreffen der Gruppe (und in der Zwischenzeit) war es möglich eine passende Struktur des Berichts zu entwickeln und ihn mit wesentlichem Inhalt zu füllen. Es wurde deutlich, dass eine perfekte Struktur kein lohnenswertes Ziel darstellt, Aufbau und Inhalt sollen aber für den Leser verständlich sein. Ziele des Berichts sind das Aufzeigen von Schwierigkeiten bei der Interaktion von Schiff und Schleuse und die Vorstellung von Lösungswegen. Der Bericht soll Schleusenplanern und -betreibern einen größeren Einblick in die relevanten physikalischen Prozesse geben und Erfahrungswerte zur Vermeidung von Schwierigkeiten vorstellen.

Derzeit umfasst der Bericht 120 Seiten und wird voraussichtlich 2014 abgeschlossen.

Literatur

PIANC (2009): Innovations in navigation lock design, *Report no. 106 - 2009*, PIANC Secretariat General, ISBN 978-2-87223-175-1, Brussels.

PIANC (1986): Final Report of the International Commission for the Study of Locks, PIANC, Brussels.

Verfasser

Dr.-Ing. Carsten Thorenz

Bundesanstalt für Wasserbau

Kussmaulstraße 17

76187 Karlsruhe

Tel.: 0721/9726-3560

E-Mail: carsten.thorenz@baw.de

Schleuse Lüneburg - Eine 38 m-Schleuse in Deutschland

Dipl.-Ing. Thilo Wachholz

Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt
Außenstelle Mitte, Hannover

Zusammenfassung

Mit einer Schleuse einen 38 m-Hub vollbringen ist eine sehr spezielle Aufgabe. Deutsche Untersuchungen haben gezeigt, dass es technisch möglich, sinnvoll und effizient ist, eine derartige Schleuse zu bauen. Wegen dem nahe gelegenen Schiffshebewerk in Lüneburg dürfen bei der Baugrubenkonstruktion und bei der Errichtung der Schleuse keine Setzungen und wasserwirtschaftlichen Beeinflussungen eintreten. Die Lösung ist eine ganz neue Schleusenkonstruktion, die mit einem geschlossenen Wasserkreislauf arbeitet.

1. Einleitung

Die großen deutschen Flüsse sind über künstliche Kanäle verbunden, die zu Beginn und ab Mitte des letzten Jahrhunderts errichtet wurden. Die hierbei gewonnenen Erfahrungen stellen für den Kanalbau und für die Wasserbauwerke einen großen Erfahrungsschatz dar. Diese Erfahrungen führten zu mehr und mehr effizienten Lösungen. Das deutsche Binnenwasserstraßennetz hatte sich ca. 1980 mit einer Länge von mehr als 9.000 km voll entwickelt. Davon sind 3.000 km schiffbare Flüsse und Stauhaltungen und 1.700 km Schifffahrtskanäle. Zusammen sind rd. 450 Schleusenkammern und 300 Wehre sowie 4 Schiffshebewerke errichtet worden.

Nun steht eine 38 m hohe Schleusenammer im Fokus des Interesses.



Abbildung 1: Der nördliche Teil des Deutschen Binnenwasserstraßennetzes

2. Die heutige Situation

2.1 Der Elbe-Seitenkanal

Der Elbe-Seitenkanal ist ein 115 km langer Schifffahrtskanal in Niedersachsen (Deutschland). Er verbindet die Elbe bei Lauenburg mit dem Mittellandkanal in der Nähe von Wolfsburg. Er stellt eine wichtige Transportrelation als Hinterlandanbindung Hamburgs zu den

industriellen Regionen in der Mitte Deutschlands dar (Hannover, Braunschweig, Wolfsburg oder Magdeburg) und ist gleichzeitig der Bypass eines Abschnitts der Elbe bei begrenzten Schifffahrtsverhältnissen dort.

Bedingt durch die (inter)nationalen Verhältnisse in Deutschland zu der Zeit der Errichtung des Elbe-Seitenkanals war dieser Wasserweg gleichzeitig eine Umfahrung der Elbe außerhalb der Deutschen Demokratischen Republik dar. Insgesamt verkürzt der Elbe-Seitenkanal auch heute noch die Strecke auf dem Binnenwasserweg zwischen Hamburg und Magdeburg um mehr als 30 km, stellt konstante Wassertiefen bereit und erlaubt Schifffahrt unabhängig von den Strömungen und Wasserschutzverhältnissen in der Elbe.

Der Bau des Elbe-Seitenkanals begann 1968. Er wurde im Juni 1976 eingeweiht. Der Höhenunterschied zwischen dem Mittellandkanal und der Elbe beträgt 61 m, der durch einen Schleusenabstieg in Uelzen (23 m) und ein Schiffshebewerk (38 m) in Scharnebeck realisiert wird. Letzteres ist auf dem Konstruktionsprinzip des Gegengewichtshebewerks entwickelt und enthält 2 unabhängige Tröge. 2006 wurde in Uelzen eine zweite Schleusenammer errichtet und in Betrieb genommen. Sie wurde wegen der technischen Schwierigkeiten der ersten Anlage und zur Betriebssicherheit des gesamten Kanals errichtet.



Abbildung 2: Schleusen Uelzen I und II

Der Elbe-Seitenkanal war ursprünglich für die Europäische Wasserstraßenklasse IV-Schiffe entwickelt worden (1.350 t, 80 m Länge, 2,5 m Tiefe). Der Kanalquerschnitt spiegelt diese Dimension wieder und führt zu einem 53 m breiten und 4 m tiefen Kanal.

Die Schleuse Uelzen wurde für eine nutzbare Länge von 185 m konstruiert. Im Gegensatz dazu wurden die Tröge des Schiffshebewerks in Lüneburg mit einem unüberwindlichen Hindernis errichtet. Beide Tröge bekamen nur eine Länge von 100 m Länge. Dieses ist auch insbesondere der Grund, warum die Abstiegsanlage in Lüneburg einen Engpass in diesem Teil des Wasserstraßennetzes darstellt. Schiffe der Wasserstraßenklasse Vb können nicht passieren.

Unabhängig davon entwickelte sich auf dem Elbe-Seitenkanal in den letzten Jahren ein sehr positiver Gütertransport. Die Prognose für 2015 sieht eine weitere Steigerung vor bis zu einer Transportmenge von rd. 11 Mio. Tonnen. Dies vorausgenommen, erscheint die Vergrößerung der Kapazität der Schleusenanlagen an dem Elbe-Seitenkanal als eine gute Entscheidung.

2.2 Schiffshebewerk in Lüneburg

Das Schiffshebewerk Lüneburger in Scharnebeck ist ein integraler Bestandteil des Elbe-Seitenkanals. 1976 wurde das Doppelvertikalschiffshebewerk in Betrieb genommen und kann Schiffe der europäischen Wasserstraßenklasse IV mit einer Tauchtiefe von 2,50 m über die 38 m Höhendifferenz zwischen den beiden angrenzenden Stauhaltungen heben.

Nach der Inbetriebnahme begann eine Phase mit vielen baulichen Schwierigkeiten. Diverse Ergänzungen und Verbesserungen waren erforderlich. Es wurde ersichtlich, dass ein Schiffshebewerk als ein komplexer technisches Maschinenbauwerk begriffen werden muss. Nach über 10 Jahren Ergänzung und Verbesserung läuft der Betrieb des Schiffshebewerks letztendlich zufriedenstellend.

Um den Fortbetrieb dieses Bauwerks auch weiterhin zu sichern, stehen nach nun ungefähr der halben technischen Lebensdauer enorme Reparaturen und Überholungsarbeiten am Schiffshebewerk an.



Abbildung 3: Schiffshebewerk Lüneburg bei Scharnebeck

3. Grundsätzliche Anforderungen und Herausforderungen

3.1 Eine neue Konstruktion

Die gegenwärtigen begrenzenden Abmessungen des Schiffshebewerks Lüneburg führen zu einer verschärften Engpasssituation für die Binnenschifffahrt. Zurzeit können mit der Troglänge von 100 m nicht ausreichend große Schiffe der Länge 110 m und Schubverbände von 185 m abgewickelt werden. Bezüglich der Tiefe des Troges von 3,38 m stellt die Abladung von 2,80 m tiefen Fahrzeugen eine extrem knappe Verkehrssituation dar. Zusammen mit der Lage des Bauwerkes stellt sich eine negative Situation dar. Heute ist das Schiffshebewerk in Lüneburg ein extremes Nadelöhr für die gesamte Hinterlandanbindung des großen Seehafens Hamburg. Immer wiederkehrende spontane Stillstände zur Unterhaltung der Technologie und die immer wiederkehrenden Ersatzinvestitionen behindern die Schifffahrt enorm. Aber insbesondere die Wartezeiten verteuern die Schifffahrt und die Logistikketten zwischen dem Seehafen und den Industrieverteilungs- und Logistikketten geraten durcheinander. Schifffahrtsunternehmen, Hafen- und Industrieverbände an Elbe und im Umfeld verpassen keine Gelegenheit, ein größeres und langlebigeres Abstiegsbauwerk einzufordern.

Der Hauptgesichtspunkt für die gegenwärtigen Untersuchungen sind zukunftsorientierte Lösungen für einen zuverlässigen Transportweg über den umweltschonenden Wasserweg. Das Projekt soll den Gütertransport zwischen dem Seehafen Hamburg und dem Hinterland (Deutschland, Tschechien, Polen) verbessern und Ausfallzeiten des Schiffshebewerks Lüneburg eliminieren. Die Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse an diesem Punkt des Wasserstraßennetzes würde auch die Fahrbarkeit mit großen Schiffseinheiten ermöglichen. Nicht zuletzt werden die Transportbedingungen für einen umweltfreundlichen Transport auf Binnenwasserstraßen verbessert und damit die CO²-Emissionen reduziert. Nicht zuletzt kann davon berichtet werden, dass möglicherweise die obere Stauhaltung in Lüneburg als Speicherbecken zur Wiedergewinnung von erneuerbaren Energien genutzt werden kann.

3.2 Kosten-Nutzen-Analyse

Weil ein derartiges Projekt alles andere als ein Wunschprogramm ist, sind in Fällen wie diesen fundamentale Analysen erforderlich.

2009 zeigte eine überschlägliche Analyse für ein neues Schleusenbauwerk bei Lüneburg, dass die sofortige Investition einer neuen Schleuse mit vergrößerten Dimensionen einen hohen Nutzen-Kosten-Faktor erzielen wird.

Das Nutzen-Kosten-Verhältnis liegt in einem Bereich zwischen 2,66 und 6,39, abhängig von der Bandbreite des abgeschätzten Transportvolumens, der Abmessung der Kammer usw. Dabei zeigten die Alternativen für eine erweiterte, verlängerte Kammer die besten Ergebnisse. Somit ist eine 225 m lange Schleusenkammer mit ihren höheren Kapazitäten gegenüber Schleusenabmessungen mit kürzeren effektiven Längen bei leicht geringeren Baukosten im Vorteil.

Die abschließende Entscheidung über den Bau eines neuen Wasserbauwerks muss mit dem Bundesverkehrswegeplan 2015 getroffen werden, der zurzeit auf der Basis der Transportprognose für das Jahr 2030 erstellt wird.

Eine neue Schleuse unterstützt die Entwicklung einer Modernisierung der Binnenschiffflotte. Dieses Projekt wird das Nadelöhr beseitigen, das die Effektivität des Wasserweges in der Vergangenheit deutlich reduziert hat. In jedem Fall wird durch diese Maßnahme garantiert, dass die Passage durch den Abstieg auf Dauer vor dem Hintergrund eines älter werdenden Schiffshebewerks gesichert ist.

3.3 Grundsätzliche Optionen

Weitere Untersuchungen wurden mit dem Blickpunkt angestellt, welche Art von Konstruktion den Engpass am besten eliminieren würde, insbesondere für lange Schiffe und Schubverbände.

Die ersten Analysen zur längeren Ausbildung eines Hebewerktroges kamen zu dem Ergebnis, dass es technisch zurzeit nicht möglich ist, denn die Entwicklung eines Schiffshebewerks mit überaus großen Längen würde zu einer völlig neuen Konstruktion führen. Da an dieser Stelle aber größere Dimensionen als

Schleusen

Schleuse Lüneburg - Eine 38 m-Schleuse in Deutschland

139 m verlangt werden, scheidet ein Hebewerk aus. Es kommt quasi nur die Errichtung einer Schleuse in Betracht. Die Entscheidung, welche Art von Konstruktion am besten geeignet ist, ob eine Schleuse oder ein Schiffshebewerk, wurde auch unter Bezugnahme auf jüngere Projekte beider Arten in Deutschland entwickelt: die neuen Schleusen in Uelzen II (23 m Höhe) oder Minden (ca. 15 m Höhe) und das neue Schiffshebewerk in Niederfinow (36 m Hubhöhe).



Abbildung 4: Neues Schiffshebewerk in Niederfinow – zurzeit im Bau

Die Berechnungen zeigen, dass eine Schleuse mit derartigen Dimensionen wie in Lüneburg erforderlich 40 % günstiger zu errichten ist als ein Schiffshebewerk. Obwohl die Pumpkosten einer Schleusenlösung höher sind, sind die Differenzkosten des Betriebes und der Unterhaltung fast gleich, da für ein Schiffshebewerk viel höhere Unterhaltungskosten entstehen.

Die grundsätzliche Untersuchung einer neuen Schleuse mit derartigen Dimensionen wurde im Mai 2010 fertiggestellt. Anschließend wurde entschieden, die Planungsvorbereitungen für eine Schleuse mit den Nutzlängen von 225 m weiter fortzusetzen.

4. Technische Möglichkeiten einer überhohen Schleuse

4.1 Allgemeines

Eine grundsätzliche Voraussetzung und Dokumentation für jedes neu zu entwickelnde Projekt ist die Erstellung eines zusammenfassenden Planungsdokuments. Darin wird die grundsätzliche Aufgabe formuliert und die nächsten Projektschritte und deren Entscheidungsmerkmale dargelegt.

Dafür ist es nötig, die unterschiedlichen Aufgaben und Funktionen des zukünftigen Bauwerks zu klären, um dessen sicheren Betrieb zu gewährleisten und gleichfalls den notwendigen Einfluss auf die Umwelt und für den Ausgleich und Ersatz zu bestimmen. Dies ist Voraussetzung für weitere Schritte in Richtung Realisation des Projekts im Zusammenhang mit verschiedenen

neuen Elementen der Konstruktion von Schleusen. Die neue Schleuse wird u.a. mit 12 Sparbecken geplant.

Um sicherzustellen, dass die erforderliche Konstruktion in Zustand und Umständen alle Randbedingungen für die Genehmigungsprozedur enthält und gleichfalls die finanziellen Ressourcen bereitgestellt werden, sind in der letzten Zeit die folgenden beschriebenen Untersuchungen angestellt worden.

4.2 Konstruktion

Die nächsten Schritte orientierten sich an der Frage, ob es möglich ist, eine Schleuse unter den gegebenen Umständen zu konstruieren. Sollte dies nicht möglich sein, würde der „Planungskompass“ vollständig umgestellt werden müssen und das gesamte Projekt in Frage gestellt.

Die erste Aufgabe bestand darin zu ergründen, ob existierende Schleusen in einer gleichartigen Höhe gebaut wurden und in welcher Art der Konstruktion und Tragwerk sie errichtet sind. Die Antwort ist deutlich: Es gibt verschiedenste Beispiele. Eine von ihnen ist die Schleuse Tucuruí mit 36,5 m in einem Staudamm am Rio Tocantins im nördlichen Teil Brasiliens. Ähnliche und größere Schleusen stehen auch in Kasachstan (Öskemen), deren Höhe 42 m beträgt, im nordwestlichen Bereich der Vereinigten Staaten von Amerika an Snake und Columbia River (diverse Schleusen zwischen 30 und 32 m) oder am Yangtze River in China.

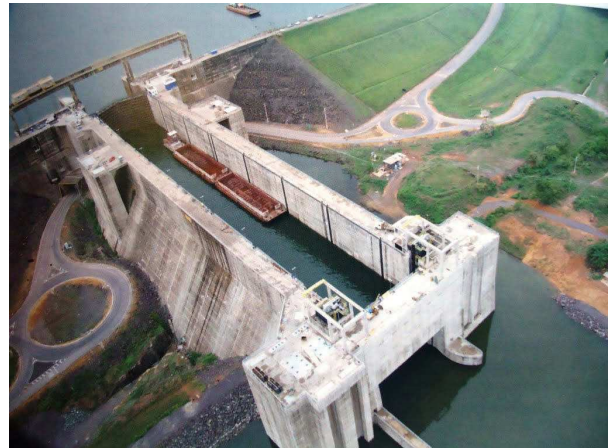


Abbildung 5: Schleuse Tucuruí (Höhe 36.5 m)

Eine gemeinsame Ausprägung dieser Schleusen ist, dass sie innerhalb einer Stauanlage in einem Fluss mit großem Abfluss integriert sind – und zwar mit der vorrangigen Möglichkeit, große hydroelektrische Energie zu erzeugen. Die Stauanlagen und so auch die Schleusen sind überwiegend in ein Tal integriert, fast alle eingebettet in stabilem Fels. Die, die nicht auf stabilem Untergrund stehen, sind Schwergewichtskonstruktionen aus Beton. Betreffend die hydraulischen Aspekte kann unterstellt werden, dass bei einer solchen Anordnung immer genug Wasser vorhanden ist, die Schleuse zu betreiben, ohne dabei das Verhältnis zur Wasserkraftanlagen und über das Wehr abzugebende Wassermengen zu stören.

Schleusen

Schleuse Lüneburg - Eine 38 m-Schleuse in Deutschland

Hier Beispiele vom Columbia River, USA.



Abbildung 6: Schleuse im John Day Dam, Columbia River

Zeigen die existierenden Schleusenprojekte, dass Schleusenstufen über 40 m grundsätzlich beherrschbar sind, so sind in Lüneburg und am Elbe-Seitenkanal andere Randbedingungen vorhanden. Insbesondere die Gründung in Sand und Kies führen zu einer extremen expandierenden Struktur. Zudem kommt der Umstand, dass der Kanal selbst keinen natürlichen Zufluss besitzt. Eine ungefähr 200 m lange und 12,50 m breite Schleusenkammer benötigt ungefähr 95.000 m³ Wasser für einen Schleusendurchgang. Ohne weitere Kommentierung wird klar, dass eine Schleuse Lüneburg Sparbecken benötigt, und insbesondere auch deshalb, weil der Schleusungsprozess keinen Einfluss auf das beiliegende Schiffshebewerk haben darf (Schwall und Sunk). Die Anordnung von Sparbecken kann in zwei unterschiedlichen Weisen vollzogen werden.

Zum einen ist eine terrassenförmige Anordnung auf einer oder auf beiden Seiten der Schleusenkammer möglich, zu anderen in der etagenförmigen Integration in den Schleusenkammerwänden (siehe Abb. 7 bzw.

Abb. 8). Die erste Option benötigt sehr viel Raum. Die langen Zuleitungen, die die Sparbecken der Schleusen-kammer verbinden, sind hydraulisch eine schlechte Lösung. Dauerhafte Lastwechsel werden eine schwierige Situation der Gründung aufwerfen.

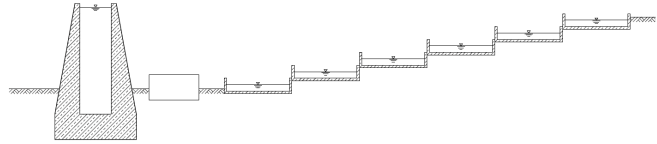


Abbildung 7: Schleusen-kammer mit terrassenförmig angeordneten Sparbecken

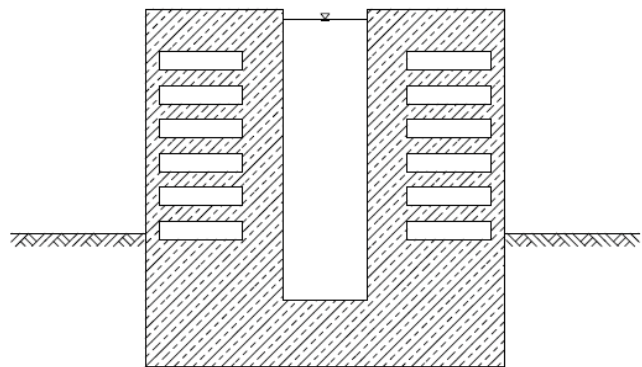


Abbildung 8: Schleusen-kammer mit etagenförmig angeordneten Sparbecken

Sparbecken, die etagenförmig in den Wänden der Schleusen-kammer integriert sind, haben diese negativen Aspekte nicht und führen quasi automatisch zu einem Tragwerk mit großer Steifigkeit, die in diesem Projekt sowieso erforderlich wird. Schleuse Uelzen II ist ein gutes Beispiel dafür. Nach 8 Jahren Betrieb zeigt sich, dass es sich diese Konstruktionsart als gut bewährt hat. Die Erfahrungen mit den Setzung und Verformung sind sehr zufriedenstellend.

Die Tragwerksstruktur einer U-Form zu einem Format zu noch größeren Wandhöhen über 30 m Hub zu entwickeln, führt das Prinzip an seine Grenzen. In einer engen Kooperation mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) wurde ein Strukturkonzept für ein geschlossenes Rahmentragwerk mit oben liegenden kreuzenden Balken entwickelt, in eine Riegelquerschnitt von 2 m x 2,50 m in einem Abstand von rd. 15 m (im Einzelnen siehe Abb. 9 und 10).

Das Projekt folgt nun dieser Konzeption und wird in den nächsten Planungsphasen weiter optimiert.

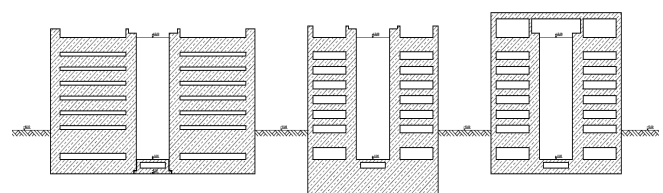


Abbildung 9: Untersuchte Strukturformen: Schwergewicht, U-Rahmen, geschlossenes Rahmenwerk

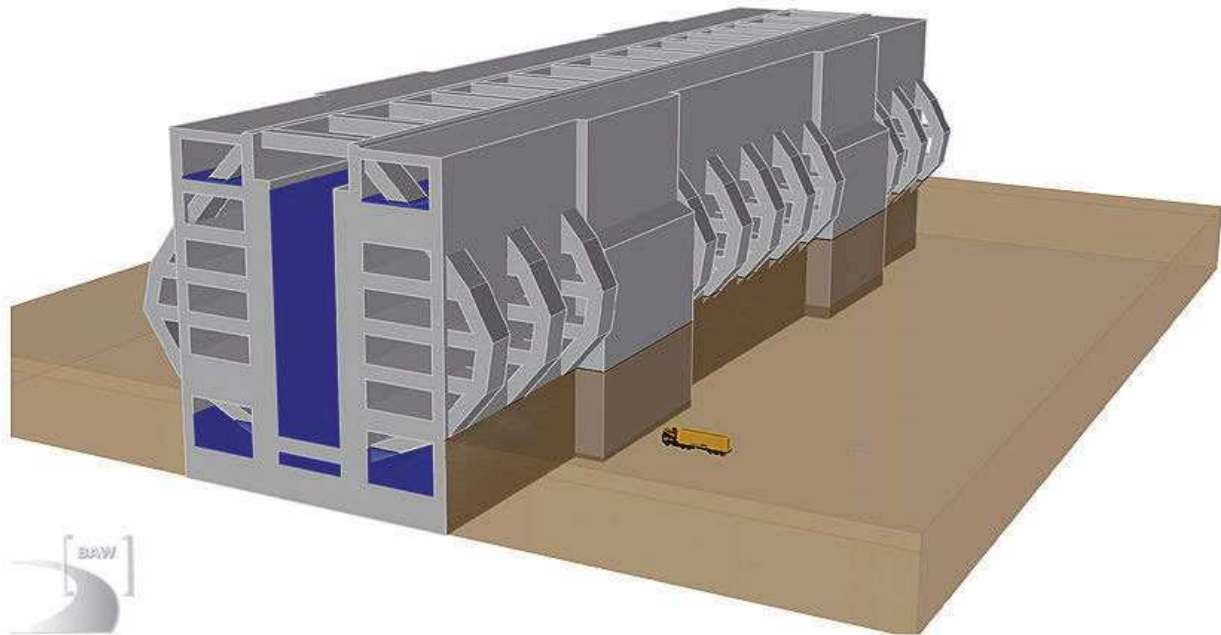


Abbildung 10: BAW-Untersuchungen für ein Strukturkonzept zu Rahmen mit oberen Zugbalken

4.3 Hydraulische Aspekte

Das Management der Wasserversorgung auf dem Elbe-Seitenkanal darf nicht durch den Betrieb der Schleusenanlage beeinflusst werden. Im Falle des Ausfalls eines individuellen Sparbeckens oder anderen Wasserverlusten soll das hydraulische Kontrollkonzept zusammen mit einem Pumpsystem funktionieren.

Die Konfiguration mit Sparbecken in Etagenordnung führt zurück in den Beginn des letzten Jahrhunderts. Die Schleusen am Mittellandkanal (Minden und Hannover mit ca. 15 m Hubhöhe) sind in dieser speziellen Art gestaltet und arbeiten bzw. funktionieren immer noch in einer zufriedenstellenden Art und Weise. Weiterführende Untersuchungen in den 1960er Jahren, basierend auf kleinen maßstäblichen Modellversuchen (M. 1:20), zeigen, dass das Füllen und Entleeren einer 38 m Schleuse in ca. 15 Minuten zufriedenstellend funktionieren kann. Diese Ergebnisse sind 2011 von der Bundesanstalt für Wasserbau reproduziert worden und zwar durch die Verwendung eines numerischen Modells.

In Ergänzung zu den Sparbecken wie bei normalen Sparschleusen werden hier untere und obere Sparbecken zur Verfügung gestellt. Die Grundidee ist, dass die Restwassermenge nicht nach Unterwasser abgegeben werden soll – so wie üblich –, sondern in ein tieferes Becken abgeleitet wird. Eine in der Schleuse integrierte Pumpstation wird die Verlustwassermenge wieder in ein Oberbecken zurückpumpen und zwar während der Kreuzungsschleusungsdauer. Anschließend wird das Wasservolumen im Oberbecken für die Schlussfüllung der Kammer verwendet; bei Sparschleusen wird dieses Volumen üblicherweise aus dem Oberwasser entnommen.

Aus diesem Grund ist die Schleusenfunktion als ein geschlossenes Kreislaufsystem zu begreifen. Diese Art der Konstruktion verhindert den Abfluss aus dem Oberwasserkanal (Sunk) sowie die Abgabe in den Unterwasserkanal (Schwall). Beides hätte ansonsten

auf den Betrieb des Schiffshewerks negative Effekte.

Mit dieser Anordnung können nun 80 % des Wassers gespart werden. Die verbleibende Wassermenge zwischen dem Wasserspiegel in der Kammer und dem Kanal, das durch einen Durchfluss der Schleusentore geplant ist, ist sehr klein und wird den Betrieb des Schiffshewerks quasi nicht bemerkt.

Das zukünftige Pumpschema wird sich signifikant von heute sehr einfachen Rückpumpsystemen, wie sie derzeit das Wasserbedarfsmanagement an künstlichen Wasserstraßen kontrollieren und regulieren, unterscheiden. Die Integration dieses hydraulischen Pumpkonzepts muss noch hinsichtlich der Optimierung der Energieeffizienz für den in dem beschriebenen Prozess überprüft werden. Dabei bleibt auch in Bedacht, den oberen Wasserspeicher für die Erzeugung aktiver Energien regional zu nutzen.

4.4 Baugrubenkonzept

Wegen der sehr kräftigen Ausmaße des Schleusenbaukörpers von über 230 m Länge und ca. 60 m Breite stellt die Baugrube eine spezielle Aufgabe dar.

Auch weil die Baugrube in unmittelbarer Nähe des Schiffshewerks in Scharnebeck liegt, muss das Aushub- und Aussteifungskonzept grundsätzlich so gestaltet werden, dass die Bodenbewegungen keine substantiellen Effekte auf den Betrieb des Schiffshewerks ausüben. Mit einer Tiefe von ca. 26 m ist die Baugrube eine besondere technische Herausforderung und muss sehr detailliert untersucht werden, um abzuschern, dass die o. g. Anforderungen erfüllt werden. Deshalb werden sehr genaue Berechnungen und Überwachungen auch von den ausführenden Unternehmen gefordert werden.

Die Optimierung der Baugrubenkonzeption führt zu der Frage der tolerierbaren Verformungen beim bestehenden Schiffshewerk. Für diese Aufgabe werden di-

Schleusen

Schleuse Lüneburg - Eine 38 m-Schleuse in Deutschland

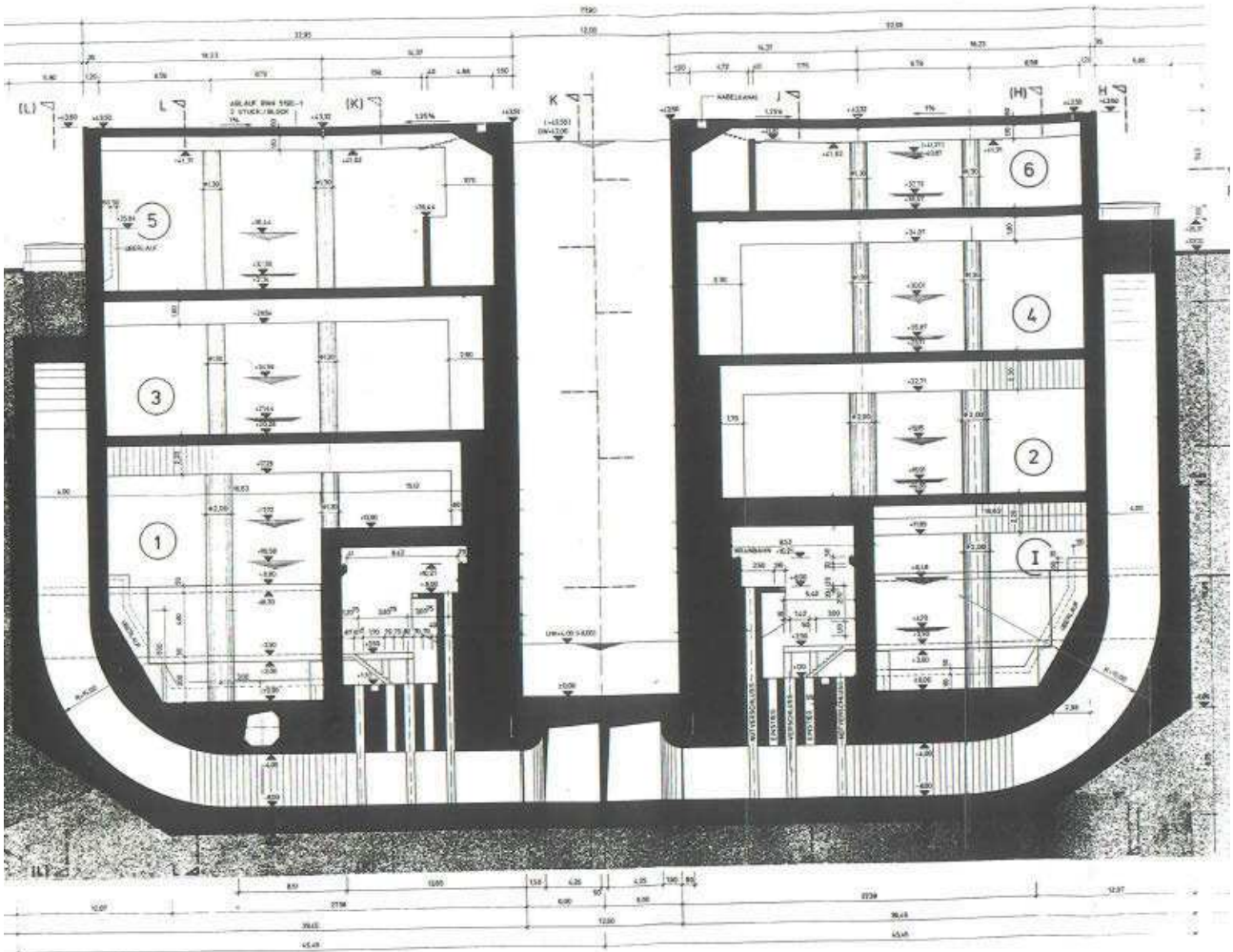


Abbildung 11: Nicht realisiertes Design einer Schleuse in Lüneburg (1968)

verse Messungen schon jetzt während des Betriebs durchgeführt, um die gegenwärtigen Deformationen und Verformungen auch in die Kalkulation bzw. derzeitigen Berechnung einzufügen.

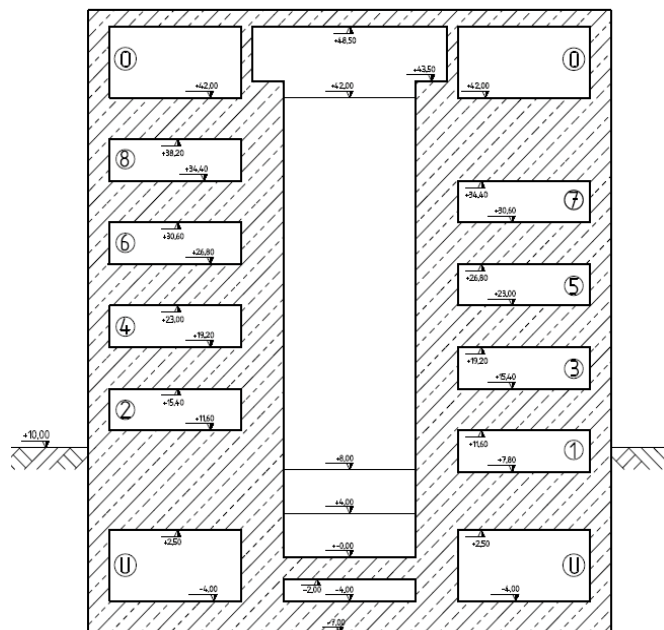


Abbildung 12: Aktueller Querschnitt eine Schleuse mit unterem und oberem Zusatzparbecken

4.5 Deutsche Standards für Schleusenbauwerke

In Deutschland ist die gegenwärtig bestehende Wasserstraßeninfrastruktur hauptsächlich in den 1950er oder 1960er Jahren entwickelt worden. Das Alter dieser Bauwerke kommt mehr und mehr in den Fokus. Eine deutschlandweite Betrachtung aller hydraulischen Wasserbauwerke zeigt, dass sich die Schleusen und Wehre einer Erneuerungsphase nähern oder grundsätzlich modernisiert werden müssen. Da gegenwärtig schon eine Reihe von Schleusen neu errichtet wird, wurden hierfür einige Standards für die Neuerrichtung und den Betrieb dieser Wasserstraßeninfrastruktur entwickelt.

So lassen sich auch aufgrund der begrenzten finanziellen und personellen Ressourcen gute, eingängige Lösungen abbilden. Standards sind Konstruktionskomponenten und Elemente in einheitlicher Ausbildung. Wenn eine große Anzahl von einheitlichen Standardelementen in Betrieb ist, wird dies eine enorme Vereinfachung des Betriebs und der Unterhaltung gewährleisten.

Obwohl die Einführung von standardisierten Lösungselementen großen Schritte der Innovation hemmt oder hemmen kann, haben die deutschen Wasserstraßenbehörden sich dennoch gegen diverse Ausbildungen von Elementen entschieden. Es sollen einfache und robuste Bauteile entwickelt werden, um gleichzeitig für

Schleusen

Schleuse Lüneburg - Eine 38 m-Schleuse in Deutschland

einen Ersatz und Verbindung vereinfacht zur Verfügung zu stehen.

Die deutsche Wasserstraßenverwaltung hat eine Kommission eingesetzt, die gemeinsame Standards der Infrastruktur der Wasserstraßen in Deutschland entwickeln lässt und zur Verfügung stellt.

Eine Reihe von Standards ist fertiggestellt und kann nun für das Großprojekt einer Schleuse in Lüneburg zur Verfügung gestellt werden. Andererseits werden die Ergebnisse des Planungsprozesses für die Schleuse in Lüneburg selbst auch in die zukünftige Konzeption und Planung von Schleusen rücküberführt werden können, insbesondere der energieeffiziente Betrieb des Pumpsystems und des Rettungssystems.

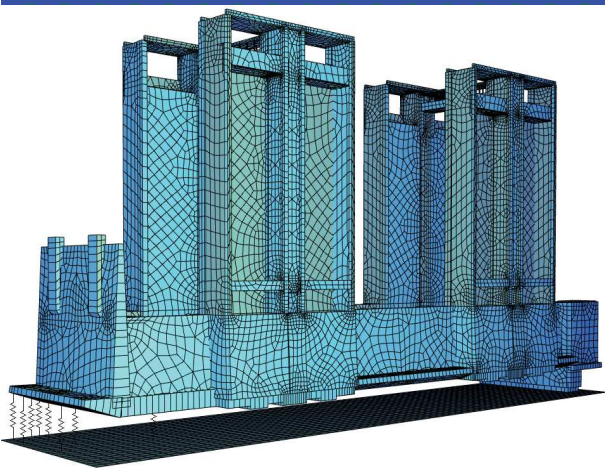
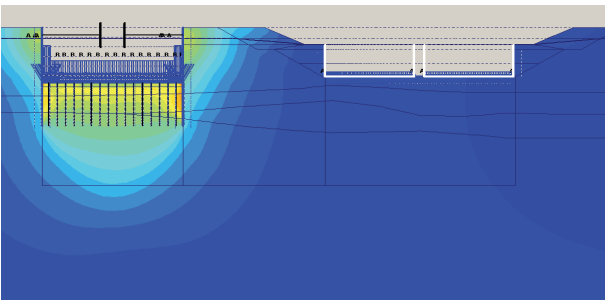


Abbildung 13: 3-Dim. Berechnung der Baugrube und des bestehenden Schiffshebewerks

4.6 Weitere Aktivitäten

Umweltverträglichkeitsuntersuchung:

Alle Einflüsse auf die Bevölkerung und die Umwelt während der Bauphase und des Betriebs der neuen Schleuse müssen untersucht werden. Basierend auf den Ergebnissen von Ausgleichs- und Ersatzuntersuchungen werden im Planfeststellungsverfahren spezielle Aktivitäten und Maßnahmen erörtert und beschlossen, die die Einflüsse des Bauwerks bzw. seiner Erstellung auszugleichen.

Konzept für den Betrieb und die Sicherheit:

Das Bauwerk wird in all seinen Bauteilen und Funktionen sehr komplexes. Darin werden viele Arbeiten mit diversen Funktionen gleichzeitig zu erledigen sein. Zukünftige Unterhaltung und Reparaturarbeiten in diesem Umfeld mit sehr variablen und mobilen Kompo-

nenten bergen Risiken für die betrieblichen Mitarbeiter. Daher sollen noch präventive Maßnahmen für diese Risiken untersucht und entwickelt werden, und zwar schon während der Entwicklungs- und Planungsphase der diversen Installationen. Gefährdungsanalysen betreffend die Europäische Maschinenrichtlinie für diese neue Schleuse werden unternommen, insbesondere wegen des modifizierten hydraulischen Konzepts und des integrierten Pumpsystems.

Kollisionskonzept/Feuerbekämpfungskonzept:

Bei dieser neuen Art von Schleusenkonzept müssen mögliche Schäden von einzelnen, individuellen Bauwerksmodulen – z. B. der Sparbecken - während der Schließungen sowie im gesamten operativen Verhalten bedacht werden. Darüber hinaus gilt es, einen besonderen Feuerschutz zu gewährleisten, u. a. für die oben liegenden Querträger des geschlossenen Rahmentragwerks.

Zudem sind als ein wichtiges Planungsteil Konzeptionen für die Entrauchung der extrem tiefen Schleusenkammer in Betracht zu ziehen. Das Konzept muss speziell auch auf die Situation von in Feuer geratenen Fahrgast- oder Gütertransportschiffen in der tiefen Kammer fokussieren und die Lösungen Rettungsmöglichkeiten gewährleisten.

5. Ausblick

In den nächsten 2 Jahren werden für die Schleuse in Lüneburg die abschließenden Planungen vorgenommen. Wenn das Gesamtkonzept unter Beachtung all der o.g. Anforderungen bestätigt wird – und die finanziellen Möglichkeiten es erlauben –, können die Genehmigungsanträge für den Bau der Schleusenanlage eingereicht werden. Nach dem Planfeststellungsbeschluss kann der Bau beginnen. Das Bauwerk wird nach etwa 6 Jahre zum Betrieb zur Verfügung stehen.

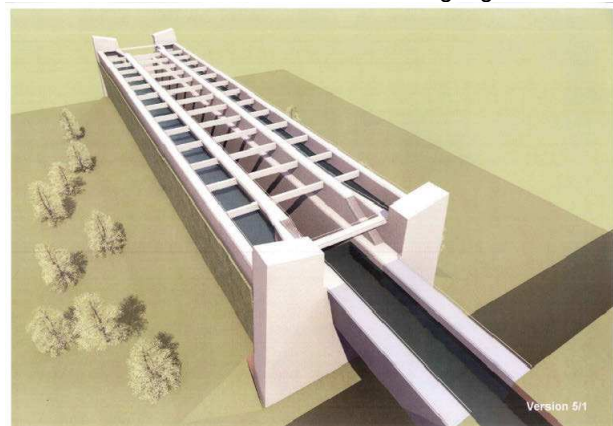


Abbildung 14: Design-Konzept der neuen Schleuse Lüneburg

Mit der neuen Konstruktion einer Schleuse in Lüneburg wird der Elbe-Seitenkanal zu einem Wasserweg der Europäischen Wasserstraßenklasse Vb erweitert. Dies Projekt erlaubt es, voll abgeladene, große Güterschiffe und Schubverbände bis zu einer Länge von 190 m und einer Tiefe von 2,80 m Abladung an der Haltung Lüneburg passieren zu lassen. Die neue Konstruktion der Schleuse Lüneburg stellt eine wesentliche Verbesserung der Hinterlandverbindung des Seehafens Hamburg dar.

Schleusen

Schleuse Lüneburg - Eine 38 m-Schleuse in Deutschland

Literatur

BAW, Studie für ein Konstruktionskonzept eines geschlossenen Rahmentragwerks mit oben liegenden Balken, Karlsruhe, 2013

NBA Hannover, Überschlägliche Wirtschaftlichkeitsermittlung für ein neues Schiffshebewerk nahe Lüneburg am Elbe-Seitenkanal, Hannover, 2009

NBA Hannover, Grundsätzliche Baubarkeit eines neuen Schleusenbauwerks, Hannover, 2010

Verfasser

Dipl.-Ing. Thilo Wachholz

Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt

Außenstelle Mitte,

Am Waterlooplatz 5

30169 Hannover

Tel.: 0511/9115-3171

E-Mail: Thilo.Wachholz@wsv.bund.de

Binnenschifffahrtswirtschaftsinformationsdienste in Deutschland

Dipl.-Ing. Nils Braunroth

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Bonn

Dipl.-Ing. Stefan Bober

Fachstelle der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes für Verkehrstechniken, Koblenz

1. Binnenschifffahrtswirtschaftsinformationsdienste (RIS – River Information Services)

1.1 Historie

RIS ist inzwischen kein neues Thema mehr.

Zu Beginn der 90er Jahre wurde erstmals mit dem Melde- und Informationssystem Binnenschifffahrt (MIB) von den Wasserstraßenverwaltungen am Rhein ein länderübergreifender Binnenschifffahrtswirtschaftsinformationsdienst in Betrieb genommen. Ziel war es, im Rahmen der Havarienvorsorge möglichst umfassende Information über den Transport gefährlicher Güter auf der Wasserstraße zu haben. Im Jahr 1998 definierte die EU ein Leitbild für RIS: die Verbesserung der Zuverlässigkeit und Nutzbarkeit der Binnenschifffahrt. Mit der Aufnahme in das Weißbuch der Europäischen Kommission zur Verkehrspolitik für 2010 sicherte die EU die Fortentwicklung der Binnenschifffahrtswirtschaftsinformationsdienste.

Die erste Version der Richtlinien und Empfehlungen für Binnenschifffahrtswirtschaftsinformationsdienste wurde dann im Jahr 2002 von PIANC veröffentlicht und im Jahr 2004 fortgeschrieben. Die Richtlinien und Empfehlungen wurden im Jahr 2004 von der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR) übernommen und verabschiedet. Seit 2005 ist der Rahmen für die technische Entwicklung von Binnenschifffahrtswirtschaftsinformationsdiensten durch eine Richtlinie der EU geregelt.

Die seinerzeit zur Erarbeitung von technischen Standards gegründeten Expertengruppen sind kontinuierlich über die Grenzen Europas hinaus gewachsen und genießen hohes Ansehen. Von Beginn an war allen Beteiligten bewusst, welche Bedeutung einheitliche technische Standards für die Entwicklung der Binnenschifffahrtswirtschaftsinformationsdienste haben würden.

1.2 Regelungen zu RIS

1.2.1 EU Direktive 2005/44/EG

Im Jahr 2005 wurde mit der europäischen RIS-Richtlinie (EU Direktive 2005/44/EG) der Rahmen für die Implementierung von RIS in Europa festgeschrieben. Einerseits wurden die Mitgliedstaaten verpflichtet, bestimmte Informationen über die Wasserstraßen, als auch Elektronische Wasserstraßenkarten für alle wesentlichen Wasserstraßen und Häfen zur Verfügung zu stellen. Andererseits wurde die Notwendigkeit einheitlicher technischer Leitlinien und Spezifikationen zur Implementierung von RIS bekräftigt und die Entwicklung folgender technischer Standards festgeschrieben:

- Ein System zur elektronischen Darstellung von Binnenschifffahrtswirtschaftskarten und von damit verbundenen Informationen (Inland ECDIS - Electronic Chart

Display and Information System on inland navigation),

- Elektronische Meldungen in der Binnenschifffahrt,
- Nachrichten für die Binnenschifffahrt,
- Schiffsverfolgungs- und Aufspürungssysteme (Inland AIS – Automatic Identification System on inland navigation).

1.2.2 Technische Leitlinien und Spezifikationen

Die im Jahr 2007 von der EU herausgegebene Verordnung (VO 414/2007/EG) über die technischen Leitlinien für die Planung, die Einführung und den Betrieb der RIS wurde im Wesentlichen im Rahmen von PIANC entwickelt. Im Jahre 2011 hat PIANC die Überarbeitung seiner Richtlinien und Empfehlungen für Binnenschifffahrtswirtschaftsinformationsdienste veröffentlicht. Aktuell befasst sich PIANC mit dem Thema „e-Navigation for Inland Waterways“ (InCom Arbeitsgruppe 156)

Die technischen Spezifikationen werden durch die Expertengruppen fortgeschrieben und, soweit erforderlich, optimiert und im Hinblick auf neue Aspekte weiterentwickelt.

Die Standards für Inland AIS, Elektronische Meldungen in der Binnenschifffahrt und Nachrichten für die Binnenschifffahrt sind seit langem veröffentlicht. Der Inland ECDIS Standard wurde am 10. September 2013 veröffentlicht.

1.3 Dienste und Systeme

Bei Binnenschifffahrtswirtschaftsinformationsdiensten (RIS) kann es sich um Fahrwasserinformationsdienste, Verkehrs- und Verkehrsmanagementdienste, Dienste zur Unterstützung der Unfallbekämpfung, transportbezogene Dienste sowie Dienste im Zusammenhang mit Wasserstraßen- und Hafengebühren handeln. Zu allen Diensten gibt es unterschiedliche mögliche RIS-Funktionen oder sogar auch RIS-Unterfunktionen. Die Implementierung von RIS kann je nach Bedarf und Möglichkeiten in der Realisierung einzelner RIS-Funktionen oder –Unterfunktionen oder in der Realisierung ganzer Dienste liegen.

Verschiedene RIS-Systeme bilden die Basis für die Realisierung unterschiedlicher RIS. Systeme sind visuelle oder radarreflektierende Schifffahrtszeichen, Lichtsignale, Mobilfunk (Sprache und Daten), GNSS zur Schiffspositionierung, UKW-Funk, Internet, Schiffs- oder Landradar, landgestützte CCTV-Kameras, Elektronische Wasserstraßenkarten (IENC), Schiffsmeldesysteme oder Schiffsverfolgungs- und Aufspürungssysteme (Inland AIS).

1.4 Förderprogramme

Zur Beschleunigung der Ausrüstung der Binnenschifffahrt mit Inland AIS Geräten und Erreichung eines hohen Ausstattungsgrades der auf deutschen und niederländischen Wasserstraßen verkehrenden Binnenschiffe bis zum Jahr 2013, wurde von Deutschland und den Niederlanden gemeinsam mit Unterstützung der

EU (TEN-T-Programm) ein Förderprogramm zur Ausrüstung mit Inland AIS aufgesetzt. Das Programm startete am 01. November 2009 und war generell nutzbar für Schiffe mit einer Länge über 20 m, die auf deutschen oder niederländischen Wasserstraßen verkehren. Schiffe mit einer Länge ≤ 20 m sind nur bei Erfüllung bestimmter Konditionen förderfähig.

In Deutschland wurde die Beschaffung und Installation des Inland AIS Gerätes mit maximal 2.100 € je Schiff gefördert, wobei der Eigenanteil des Antragstellers bei mindestens 500 € lag.

Die Niederlande und Deutschland förderten jeweils die Ausstattung der Schiffe, die in ihrem Land registriert sind. Schiffe, die in anderen Staaten der EU registriert waren, konnten wählen, in welchem der beiden Länder sie die Förderung der Ausstattung mit Inland AIS Geräten beantragen wollten. In Deutschland konnten so 1.255 Binnenschiffe gefördert werden.

Mit der Förderung ist die Verpflichtung verbunden, das Inland AIS Gerät entsprechend den Regelungen der zuständigen Behörden einzusetzen und zu unterhalten.

Eine Ausrüstungs- und Nutzungsverpflichtung von Inland AIS in Verbindung mit Inland ECDIS oder vergleichbaren Kartenanzeigergeräten auf dem Rhein ist von der ZKR zum 01.12.2014 beschlossen. Damit ist ein weiterer, wichtiger Meilenstein im Rahmen der RIS erreicht.

2. RIS in Deutschland

2.1 Dienste und Systeme

In Deutschland wurden in den letzten Jahren im Zusammenhang mit den aktuellen Implementierungen gute Voraussetzungen geschaffen um RIS zu nutzen. Einige RIS sind in Nutzung. Verbesserungen und Weiterentwicklungen sind in Implementierung oder Planung.

Die Produktion der elektronischen Wasserstraßenkarten ist nahezu flächendeckend erledigt. Derzeit (Stand Februar 2014) stehen für etwa 4350 Wasserstraßenkilometer der Klasse Va Elektronische Wasserstraßenkarten zum Download auf www.elwis.de kostenfrei zur Verfügung. Für die Kommunikation zwischen Schiff und Land als auch zwischen Schiffen wird i.d.R. UKW-Funk genutzt. Die Versorgung mit DGPS-Korrekturdaten erfolgt flächendeckend. Die Umrüstung der seit 2006 im Binnenbereich betriebenen DGPS Referenzstationen auf Virtuelle Referenzstationen (VRS)-Technik soll bis Ende 2015 erfolgen. Landradartechnik ist nur an speziellen Wasserstraßenabschnitten im Einsatz, z. B. an der Lichtwahrtschaustrecke am Rhein zwischen St. Goar und Oberwesel.

Auf den deutschen Wasserstraßen wird der Verkehr, soweit möglich und verantwortbar, ausschließlich durch Verkehrsvorschriften geregelt. Grundsätzlich sind die Schiffsführer allein verantwortlich für die sichere Schiffsführung, d. h. u. a. für die Navigation und die Organisation von Begegnungen und Überholmanöver. Lediglich für die Durchführung von Schleusungen und auch im Bereich der Lichtwahrtschaustrecke am Rhein wird der Schiffsführer über Lichtzeichen über die aktuelle Situation vor Ort informiert.

Aufgrund dieser Philosophie ist das Ziel für die Implementierung von RIS, der Schifffahrt möglichst umfangreiche und gute Informationen zur Verfügung zu stellen und verwaltungsseitig nur die Informationen zu erheben und zu speichern, die z. B. für die Abgabenerhebung, die Durchführung von Schleusungen oder für den Fall einer Havarie benötigt werden.

2.2 Aktuelle RIS-Anwendungen

Folgende Anwendungen sind derzeit in Deutschland in Betrieb:

- NIF **Nautischer Informationsfunk**
- ELWIS **Elektronisches Wasserstraßen-Informationssystem**
- MOVES **Modernes Verkehrserfassungssystem**
- MIB **Melde- und Informationssystem Binnenschifffahrt**
- Lichtwahrtschaustrecke Oberwesel - Verkehrsinformation

NIF

Der Nautische Informationsfunk ist ein zentraler oder lokaler UKW-Funkdienst, der an allen wesentlichen Wasserstraßen in Deutschland implementiert ist. Er ermöglicht die Kommunikation Schiff ↔ Schiff, Schiff → Land und Land → Schiff und ist an ca. 350 Betriebsstellen und 4 Revierzentralen im Einsatz. Mehrmals täglich wird die Schifffahrt von Land aus über Lage-, Wasserstands- und Einzelmeldungen informiert. Die Schiffsführer kommunizieren über den NIF mit den landseitigen Betriebsstellen zur Anmeldung des Schleusungsbedarfs, bei Passage von Meldepunkten oder zur Meldung einer Havarie.

Die Kommunikation Schiff ↔ Schiff ist ausschließlich für Absprache von Begegnungs- oder Überholmanövern zu nutzen und sollte nicht für den Austausch sonstiger nicht sicherheitsrelevanter Informationen genutzt werden.

ELWIS

ELWIS ist die zentrale Informationsplattform für alle Schifffahrtstreibenden auf deutschen Binnenwasserstraßen. ELWIS ist seit 1999 in Betrieb. Die Nutzung ist kostenfrei.


ELWIS ist in der Schifffahrt akzeptiert und etabliert.

2013 wurden in ELWIS 51,3 Mio. Seiten geöffnet.

Als besonderer Service sind viele Informationen über ELWIS-ABO abonniebar. Dieser Dienst ist unabhängig vom Internet und ermöglicht es dem Abonnenten je nach individueller Auswahl Informationen, wie Wasserpiegel an festgelegten Pegeln, Hoch- oder Niedrigwasservorhersagen, Nachrichten für die Binnenschifffahrt und Eis-Berichte automatisch oder ereignisbezogen per E-Mail oder SMS zu erhalten. 2013 wurden über ELWIS-Abo 3,2 Mio. E-Mails versandt. Die Verfügbarkeit lag im Jahr 2013 bei 99,96 %.

Fortschritte in der Informations- und Kommunikationstechnologie


Binnenschifffahrtswasserstraßeninformationssysteme in Deutschland



Direkt zu: [MIB](#) | [BIS](#) | [F/T](#) | [Wasserstände](#) | [Eislagen](#) | [Schleuseninformationen](#)

Elektronischer Wasserstraßen-Informationsservice (ELWIS)

Sie sind hier: [Startseite](#) > [MIB](#)



eine Ebene höher...

Nachrichten für die Binnenschifffahrt

MIB

Nachrichten für die Binnenschifffahrt

Es wurden 438 Datensätze gefunden.
174 weitere Datensätze sind aktuell gültige Fahrpläneinschränkungen und können [hier](#) eingesehen werden.

[Alle Nachrichten in der Detailsicht anzeigen](#)

In der Detailsicht werden alle hier gefundenen Nachrichten ausführlich mit allen Einzelheiten und Einschränkungen in einer Übersicht angezeigt. Die Reihenfolge der MIB ist dabei genau wie in der unten stehenden Liste. Sie können dort die MIB nach ID (neue MIB zuerst), Wasserstraße, Gültigkeit oder Herausgabedatum sortieren. Der Pfeil zeigt die aktuelle Sortierung an. Sollte Ihre Auswahl zu viele Ergebnisse liefern (Ladezeit zu lang), schränken Sie diese über die Suchkriterien weiter ein.

Nr.	ID	Wasserstraße(n) Titel	km von km bis	gültig von gültig bis	Eingabestelle Herausgabedatum
1	2059/2014	Saar - Fahrwasser Saar Sperrung wegen Veranstaltung: Sperrung	86,4 90,1	11. Okt. 2014 11. Okt. 2014	WSA Saarbrücken 16. Sep. 2014
2	2058/2014	Fulda - Schleuse Hann. Münden Sperrung wegen Arbeiten: Sperrung	108,3 108,3	22. Sep. 2014 22. Sep. 2014	WSA Hann. Münden 16. Sep. 2014
3	2057/2014	Fulda - Fahrwasser Fulda Sperrung wegen Übungen: Sperrung	101,4 101,4	20. Sep. 2014 20. Sep. 2014	WSA Hann. Münden 16. Sep. 2014
4	2056/2014	Untere Havel-Wasserstraße (Spandau - Plaue)-Fahrwasser Untere Havel-Wasserstraße (Spandau - Plaue) Begegnungsverbot wegen Arbeiten	25,0 25,3 27,8 28,2	16. Sep. 2014 auf Widerruf	WSA Brandenburg 16. Sep. 2014
5	2055/2014	Dortmund-Ems-Kanal - Fahrwasser Dortmund-Ems-Kanal Sperrung wegen Veranstaltung: Sperrung	165,4 166,4	12. Okt. 2014 12. Okt. 2014	WSA Meppen 16. Sep. 2014
6	2054/2014	Elbe - Fahrwasser Meißen Nachricht wegen Veranstaltung: Sperrung	79,0 84,0	28. Sep. 2014 28. Sep. 2014	WSA Dresden 16. Sep. 2014
7	2053/2014	Mosel - Schleuse Detzem Sperrung wegen Inspektion: Sperrung	166,2 166,2	26. Sep. 2014 26. Sep. 2014	WSA Trier 15. Sep. 2014
8	2052/2014	Mosel - Schleuse Trier Sperrung wegen Inspektion: Sperrung	195,8 195,8	25. Sep. 2014 25. Sep. 2014	WSA Trier 15. Sep. 2014
9	2051/2014	Rheinsberger Gewässer - Fahrwasser Rheinsberger Gewässer Arbeiten wegen Bauarbeiten: besondere Vorsicht	2,1 2,3	15. Sep. 2014 30. Apr. 2015	WSA Eberswalde 15. Sep. 2014

Abbildung 1: ELWIS - Beispiel einer Nachricht für die Binnenschifffahrt

Erstmals wurde in 2013 ein neuer Service, der ELWIS-Newsletters zur Verfügung gestellt. Der Newsletter wird in 4 Kategorien angeboten:

- Aktuelles (1828 Abonnenten)
- Service (1711 Abonnenten)
- Schiffsrecht (1755 Abonnenten)
- Führerscheininformationen (1690 Abonnenten)

Es wurden insgesamt ca. 30.000 Newsletter-E-Mails versandt.

Die Bedienerfreundlichkeit wird weiter optimiert. Eine fahrtroutenbezogene und eine kartenbasierte Suche von Informationen befinden sich in Entwicklung.

MOVES

MOVES (Modernes Verkehrserfassungssystem) wurde insbesondere für den Betrieb der 12 Einkammerschleusen an der Mosel im Bereich von Deutschland und Luxemburg entwickelt. An der Mosel besteht die Situation, dass bei zeitgleichem durchschnittlichem Transport von ca. 16 Mio. Gütertonnen/Jahr aufgrund internationaler Abkommen der Fahrgastschifffahrt Vorschleusungsrechte einzuräumen sind. Ziel von MOVES ist es die Wartezeiten für die Frachtschifffahrt insbesondere durch eine Verbesserung der Schleusenauslastung zu reduzieren und eine bessere Information der Schifffahrt über die aktuelle Verkehrssituation zu ermöglichen.

Die vom Schiffsführer via UKW-Funk an der ersten Schleuse gemeldeten Daten (Schiffs- und Transportinformationen) werden durch das Betriebspersonal der Schleuse in die Datenbank eingegeben. Die feststehenden vorreservierten Schleusungszeiten für die Fahrgastschifffahrt werden durch die jeweiligen Wasser- und Schifffahrtsämter eingegeben bzw. aktualisiert und auf der jeweiligen Schleusendatenbank hinterlegt. Im Vorgriff zur Fahrt des Schiffes werden die Schiffs- und Transportinformationen automatisch von Schleuse

zu Schleuse weitergeleitet, so dass sich der Schiffsführer nur noch zur Anmeldung des jeweils nächsten Schleusungsvorganges per UKW-Funk an der Schleuse anzumelden braucht, ohne Informationen über Fahrzeug und Ladung erneut zu melden.

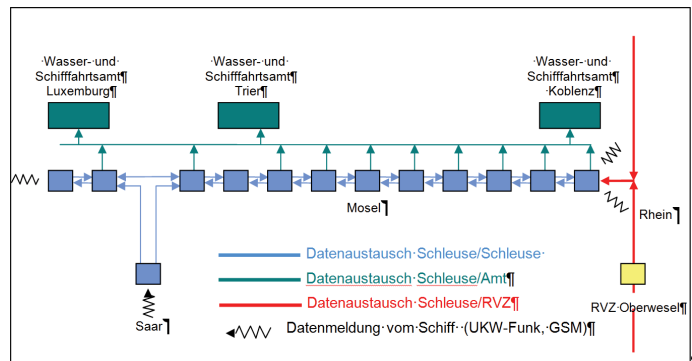


Abbildung 2: Datenströme mittels MOVES

MIB

Am Anfang der 90er Jahre wurde am Rhein der Bedarf festgestellt, dass es zur Abwicklung einer Havarie wichtig sein kann, jederzeit die im Falle einer Havarie wesentlichen Informationen über Gefahrguttransporte vorzuhalten. In Deutschland, Frankreich und der Schweiz wurde mit dem Melde- und Informationssystem Binnenschifffahrt eine in Deutschland entwickelte Software eingeführt, die Niederlande haben ihr eigenes Meldesystem (IVS90) entwickelt. Der Datenaustausch zwischen beiden Systemen wurde realisiert.

Seit nunmehr 20 Jahren ist das Informationssystem zur Unterstützung des Umganges bei Unfällen im Rheingebiet in Betrieb. Meldepflichtig sind Fahrzeuge, die gefährliche Güter transportieren, Tanker, Fahrzeuge mit einer Länge über 110 m, Verbände, Fahrgastkabinenschiffe, Seeschiffe und Sondertransporte.

Vor Beginn der Fahrt meldet der Schiffsführer die Fahrt einschl. Schiffs- und Ladungsdaten mittels UKW-Funk, Fax, Telefon oder Elektronischer Meldung an. Erst

anschließend darf er in die Wasserstraße einfahren. Während der Fahrt meldet der Schiffsführer sich erneut per UKW-Funk bei Passage eines Meldepunktes, zur Änderung der Informationen oder bei längeren Fahrtunterbrechungen. Die Revierzentralen sammeln die Informationen. Diese werden automatisch an die nächste Revierzentrale, in deren Gebiet das Fahrzeug einfährt, weitergeleitet.

Im Falle einer Havarie wird aus dem System heraus ein Notfallmeldebericht zum Havaristen erstellt. Dieser wird zur Information an die Rettungskräfte und die für die Havarieabwicklungen zuständigen Behörden weitergeleitet.

Im Nachgang zur Havarie des Containerschiffs „EXCELSIOR“ am Rhein bei Köln im Jahr 2007 wurde beschlossen, die Meldepflicht am Rhein auch auf Containerschiffe auszuweiten. Die große Anzahl der auf einem Schiff oder Verband transportierten Container machte es notwendig, eine elektronische Meldepflicht für die Erstmeldung einzuführen, da solche Meldungen zu umfangreich sind, um per UKW-Funk an die Revierzentrale gemeldet und manuell vom Bedienpersonal in die Datenbank einzutragen zu werden. Die elektronische Meldepflicht für Fahrzeuge, die mehr als 20 Container oder mindestens einen Container mit gefährlichen Stoffen transportieren, wurde zum 01.01.2010 verbindlich eingeführt.

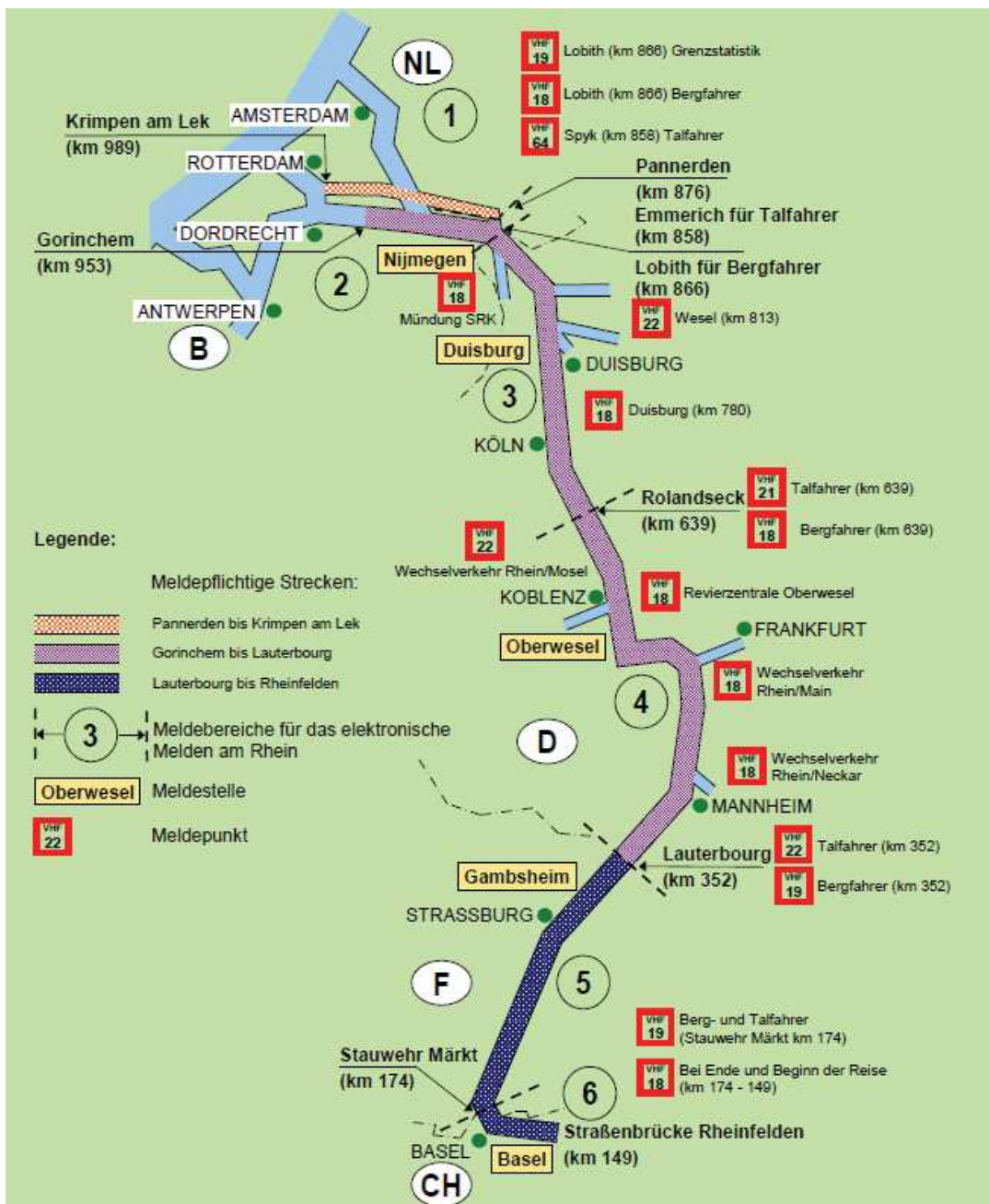


Abbildung 3: Meldepflicht am Rhein

Lichtwahrschau Oberwesel

Neben der Zuständigkeit der Revierzentrale Oberwesel u. a. für NIF und MIB ist dort ein Bedienplatz für die besondere Aufgabe der Lichtwahrschau eingerichtet. Die Lichtwahrschau-Strecke umfasst die nautisch schwierige, sehr kurvige und enge Strecke des Rheins zwischen St. Goar und Oberwesel. Die Strecke ist in vier Abschnitte unterteilt. Aufgabe des Bedienpersonals ist es, den zu Tal fahrenden Verkehr zu beobachten und je nachdem, ob ein Schiff oder Verband sich in einem Wasserstraßenabschnitt befindet, je nach maximaler Schiffskategorie ferngesteuert Lichtzeichen zu setzen. Ziel ist, dass der Bergfahrer vor Einfahrt in einen Abschnitt Informationen darüber erhält, ob und welche Fahrzeuge ihm entgegenkommen werden, um dies in seiner Entscheidung für die weitere Navigation zu berücksichtigen.

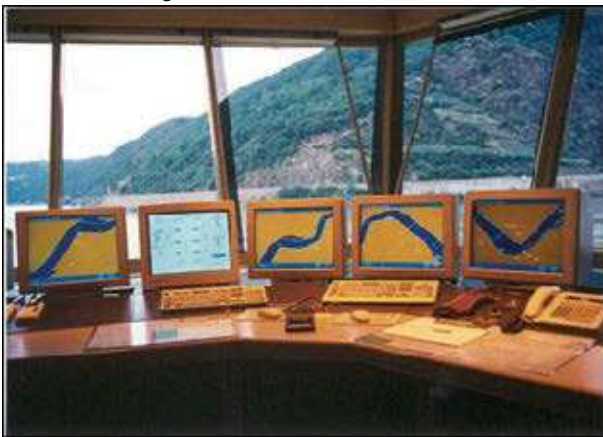


Abbildung 4: Lichtwahrschau-Bedienplatz in der Revierzentrale Oberwesel

2.3 Aktuelle Weiterentwicklungen/Erprobungen

Die ständige Optimierung des Wasserstraßeninformationssystem ELWIS wird fortgeführt. Zur Verbesserung der Datenaktualität wird schrittweise, soweit möglich, die Dateneingabe weiter dezentralisiert, um die Dateneingabe und -pflege von denjenigen durchzuführen zu lassen, die vor Ort für die Datenerhebung bzw. -änderung zuständig sind. Darüber hinaus ist beabsichtigt, schrittweise mehr Informationen graphisch aufbereitet anzubieten, um hierdurch die Verständlichkeit der Informationen zu erhöhen sowie das Angebot von Informationsinhalten zu erweitern, die über ELWIS-ABO abonniert werden können.

Insbesondere für die Unfallvorsorge wird derzeit an der Entwicklung einer neuen Meldesoftware gearbeitet. Ziel ist, das Melde- und Informationssystem Binnenschifffahrt auf allen bedeutenden deutschen Wasserstraßen einzuführen und die gemeldeten Daten für ein modernes Schleusenmanagement, die Abgabenerhebung und die Erstellung von Statistiken zu nutzen. Alle vorhandenen Binnenschifffahrtswaterinformationssysteme sollen verbessert und bedienungsfreundlicher werden. Die Erreichung dieser Ziele wird erst mit dem Einsatz von Inland AIS möglich sein.

2.3.1 Technische Erprobung

Bereits im Jahre 2001 hat die deutsche Wasser- und Schifffahrtsverwaltung erste Untersuchungen zur Nut-

zung von AIS in der Binnenschifffahrt durchgeführt. Ziel war es Erfahrungen im betrieblichen und technischen Einsatz zu sammeln und Voraussetzungen für die Weiterentwicklung des AIS für die Seeschifffahrt zum Inland AIS für den Einsatz in der Binnenschifffahrt zu ermitteln. Diese Untersuchungen bildeten den Ausgangspunkt für die Technische Erprobung von Inland AIS Mobilgeräten und deren Anwendungen (TEAM).

Das Erprobungsgebiet erstreckt sich am Rhein von Mainz bis zur niederländischen Grenze und enthält verschiedene Aspekte einer Wasserstraße, vom Gebirgsrhein über die urbane, industrialisierte Region des Ruhrgebietes bis zum Niederrhein. Dieses Erprobungsgebiet ist Teil der Wasserstraße mit dem höchsten Verkehrsaufkommen in Europa.

Wesentliche Ziele der anstehenden Erprobungen und Untersuchungen sind:

- Ermittlung von Kriterien zur Errichtung von AIS Landstationen z. B.: Standort, Infrastruktur, Kommunikationseinrichtungen
- AIS Funkausbreitung an Binnenwasserstraßen z. B.: Topographie, Installation an Bord
- Technisches Monitoring von AIS Geräten z. B.: Zuverlässigkeit, Qualität der Daten
- Aussendung von DGNSS Korrekturdaten
- AIS Funkkanalmanagement z. B.: Funkkanalschaltung, Beeinflussung des Meldeverhaltens
- AIS Schifffahrtszeichen-Gerät z. B.: AIS auf Fahrwassertonnen
- Testgebiet für die Weiterentwicklung von Inland AIS und dessen Anwendungen

Da diese Untersuchungen die Wirkungsweise von Inland AIS beeinflussen können, sollten sie nicht in einem betrieblich genutzten System durchgeführt werden.

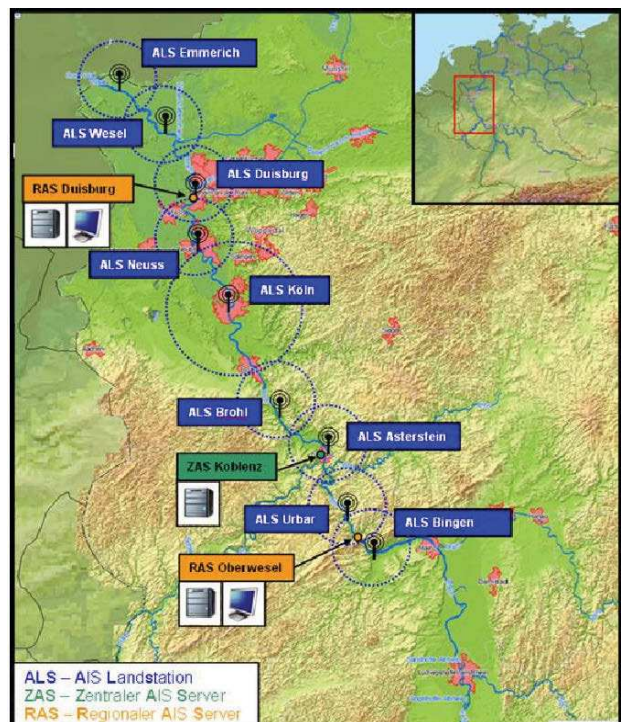


Abbildung 5: Inland AIS Testgebiet

2.3.2 Betriebliche Erprobung

2.3.2.1 Pilotprojekt Inland AIS Mittelweser

Die Mittelweser zwischen Minden und Bremen stellt die Verbindung der Seehäfen Bremen zum deutschen Binnenwasserstraßennetz dar. Die Mittelweser ist ca. 150 km lang, sie ist staugeregelt und enthält sieben Schleusenanlagen, welche von der Zentrale in Minden fernbedient werden. Wegen der wachsenden Bedeutung dieser Wasserstraße wird die Mittelweser zurzeit ausgebaut, um Schiffsgrößen bis 110 m Länge und 2,5 m Tiefgang zulassen zu können.

Während der Bauarbeiten und auch danach werden an verschiedenen Abschnitten Engstellen entstehen, welche nur einschiffig befahren werden können. Die Länge dieser Engstellen variiert bis zu 12 km im Bereich der Stauhaltung Drakenburg. Eine frühzeitige Koordinierung der Begegnung an solchen Engstellen ist zwischen den Schiffsführungen notwendig, um einen reibungslosen Verlauf der Fahrt zu ermöglichen und unnötige Wartezeiten vor den Engstellen zu vermeiden.

Begleitend zu den Ausbaumaßnahmen wurde eine betriebliche Erprobung zum Einsatz von Inland AIS zur Unterstützung der Begegnungsregelung an Engstellen durchgeführt. Beide Aspekte der Navigationsunterstützung wurden untersucht; ein verbessertes taktisches Verkehrslagebild in unmittelbarer Umgebung des eigenen Schiffes und verbesserte Informationen über den zulaufenden Verkehr zur Unterstützung der Selbstwahrnehmung. Der automatische Austausch navigationsbezogener Daten durch Inland AIS stellt einen wesentlichen Schritt zur selbstregulierenden Begegnungsregelung zwischen Binnenschiffen im eingeschränkten Fahrwasser dar.

Alle Schiffe größer 75 m Länge unterlagen der Begegnungseinschränkung an der Mittelweser. Diese Schiffe sollten an der betrieblichen Erprobung teilnehmen und wurden mit Inland AIS Geräten in Verbindung mit Inland ECDIS Geräten im Informationsmodus zur Datenanzeige ausgestattet. Einige Schiffe besaßen bereits ein Inland ECDIS mit Radaroverlay. Auch in diesem Fall war ein zusätzliches Display für Inland ECDIS im Informationsmodus erforderlich, da die Darstellung der umgebenden Verkehrslage in weiterer Umgebung als die Radarreichweite notwendig ist.

Schiffe, die nur selten die Mittelweser befahren und deshalb nicht im Rahmen des Projektes ausgestattet wurden, bekamen so genannte portable Inland AIS Geräte an Bord. Auch wenn diese portablen Geräte keine Anzeige haben, stellen sie doch den anderen ausgerüsteten Schiffen die relevanten Informationen des jeweiligen Schiffes zur Verfügung. Die portablen Inland AIS Geräte werden mit den entsprechenden Daten wie Name, Länge, Breite konfiguriert und an den jeweiligen Eingangsschleusen übergeben bzw. von Bord genommen.

Um die Teilnahme am Projekt zu fördern und um geeignete Rückmeldungen von der Schifffahrt zu erhalten wurde die bordseitige Ausstattung durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung finanziell gefördert. 96 regelmäßig auf der Mittelweser verkehrende Binnen-

schiffe wurden mit typzugelassenen Inland AIS Geräten und mit Inland ECDIS Geräten ausgestattet. Obwohl der Mittelpunkt des Interesses auf der Unterstützung der Selbstwahrnehmung liegt, werden die mittels AIS gewonnenen Daten auch in der Revierzentrale in Minden bereitgestellt. Die AIS Landinfrastruktur an der Mittelweser besteht aus sieben AIS Landstationen, die jeweils an einer Schleuse installiert sind, einer AIS Repeaterstation zur Erweiterung des Schiff zu Schiff AIS-Datenaustausches und einem regionalen AIS Server, der die Funktionalität einer Logischen AIS Landstation gegenüber den anderen RIS Diensten in der Revierzentrale Minden bereitstellt. Das Servicegebiet der einzelnen AIS Landstationen ist so gewählt, dass benachbarte AIS Landstationen sich gegenseitig überlappen. Durch diese Konstellation der AIS Landstationen ist eine Redundanz für die landseitigen AIS Abdeckungsbereiche gegeben. Die AIS Landstationen sind an gemeinsamen Standorten mit den vorhandenen UKW Sprechfunkanlagen installiert. Dadurch kann die vorhandene Infrastruktur wie Antennenmast, Gebäude, Energieversorgung und Datenübertragungseinrichtungen mitgenutzt werden. Die Datenverarbeitung wird zentral im AIS Server durchgeführt.

Die AIS Repeaterstation ist an der längsten Engstelle im Bereich der Stauhaltung Drakenburg aufgestellt und ermöglicht dort den Schiff zu Schiff Datenaustausch in einen Wasserstraßenabschnitt mit mehr als 12 km Länge. Die Repeaterstation ist mit redundanter Gerätetechnik mit zwei unabhängigen Repeatern aufgebaut um die geforderte hohe Verfügbarkeit sicherzustellen. Ein Gebietsfilter stellt sicher, dass nur Meldungen innerhalb des interessierenden Gebietes durch den Repeater wiederausgesendet werden, ein Meldungstypfilter verhindert die Wiederausendung unnötiger Meldungen. Die AIS Repeaterstation ist an einem gemeinsamen Standort mit einer UKW Relaisstation aufgebaut, welche die Schiff zu Schiff Sprechfunkverbindung für dasselbe Gebiet ermöglicht.

Der kontinuierliche Betrieb der AIS Bordgeräte ist entscheidend für die Unterstützung der Selbstwahrnehmung, da die Informationen über die Verkehrslage von Inland AIS geliefert werden. Die Inland AIS Bordgeräte an der Mittelweser werden durch das Auswerten ihrer Melderate kontinuierlich überwacht. Im Falle eines Geräteausfalls wird der Operateur in der Revierzentrale automatisch informiert. Dieser soll das betroffene Schiff informieren und eine Warnmeldung über UKW Sprechfunk an die Schifffahrt ausgeben. Das betroffene Schiff kann somit vermehrten Sprechfunk-Positionsmeldungen die Engstellen passieren

Projektteilnehmer waren verpflichtet das AIS Gerät eingeschaltet und betriebsbereit zu halten, die Daten entsprechend zu aktualisieren und die empfangenen Informationen an den Inland ECDIS Geräten zu nutzen. Die Erfahrungen und Erkenntnisse wurden berichtet und in Fragebögen entsprechend rückgemeldet. Die Ergebnisse des Piloten waren überwiegend positiv. Probleme bei der Koppelung von Inland AIS mit Inland ECDIS konnten behoben werden.

**Mittelweser-Anpassung
 Regelungsstrecken ab 2008**

Stauhaltung Drakenburg



Abbildung 6: Regelungsstrecken Mittelweser

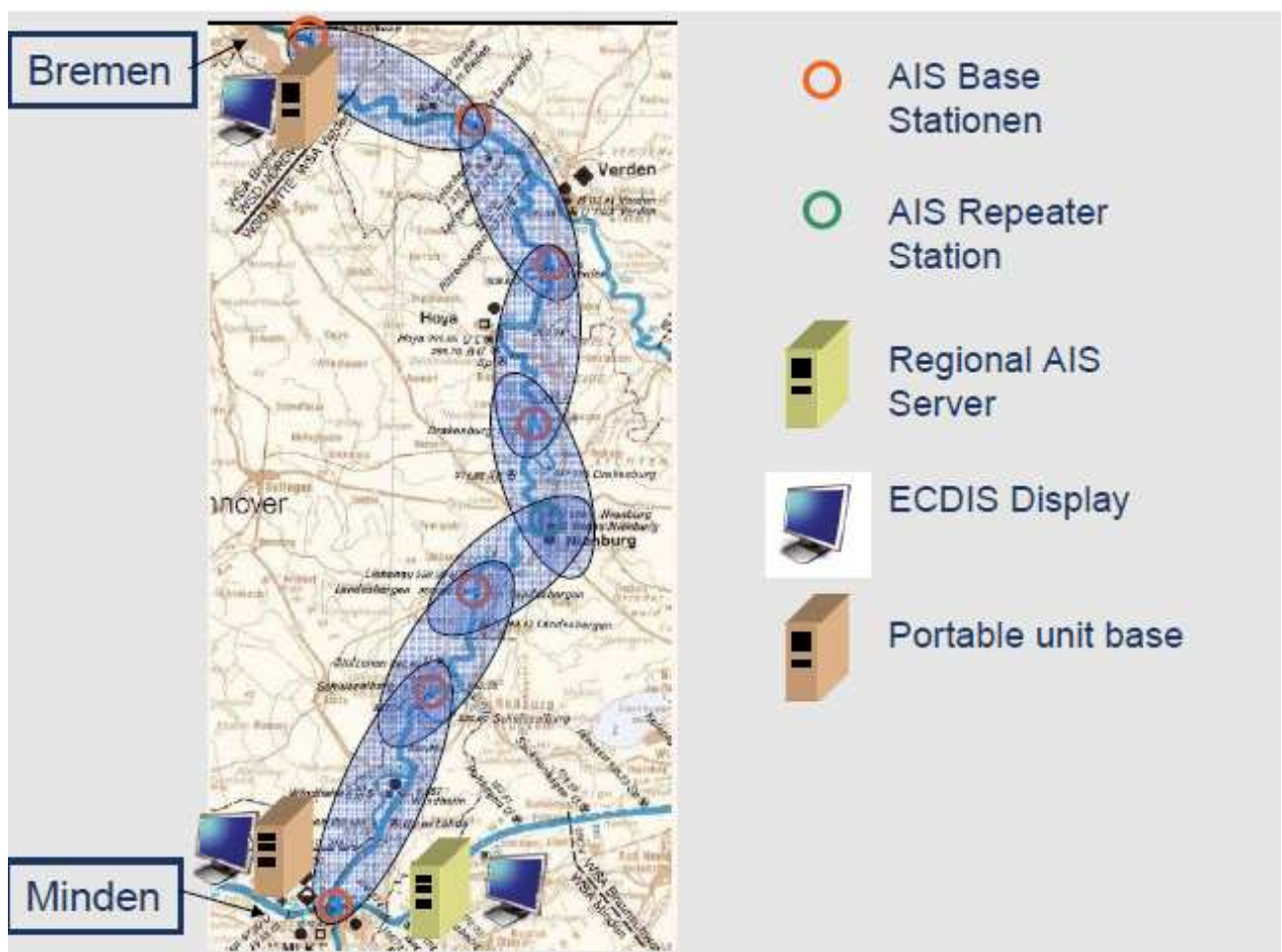


Abbildung 7: Übersicht Mittelweser Bremen – Minden (154 Km)

2.4 Aktuelle Arbeiten

2.4.1 Projekt Schleusenmanagement an der Donau

Die Donau ist eine wichtige Verbindung im europäischen Wasserstraßennetz, da es das Tor zum südost-europäischen Wirtschaftsraum und dem Schwarzen Meer darstellt. In den vergangenen Jahren wurde immer häufiger auch eine Inland AIS Infrastruktur im Rahmen der Modernisierung des südosteuropäischen Wasserstraßennetzes eingesetzt. Seit 2008 besteht für gewerbliche Schiffe im österreichischen Abschnitt der Donau eine Trage- und Einschaltpflicht für Inland AIS.

Durch die Sanierung der Schleuse Kachlet fällt eine der beiden Kammern für den Betrieb für die Dauer von 3 Jahren aus. Die ohnehin hoch ausgelastete Schleuse wird damit ein Nadelöhr für die Schifffahrt. Eine exakte Planung der Schleusenvorgänge soll die Wartezeiten für die Schifffahrt so kurz wie möglich machen. Ausgehend von der Fragestellung einer optimalen Schleusenreihenfolge für eine Schleuse soll diese Frage auf eine Schleusenketten erweitert werden. Ein neues elektronisches Verkehrstagebuch, als Ersatz für das bestehende „MOVES“ soll dabei ebenfalls mit entwickelt werden.

Zur weitgehend autonomen Ermittlung eines Vorschlags für die Schleusenplanung kann das RIS-System Inland AIS Anwendung finden. Darauf aufbauend wurde ein Konzept zur Einführung der Inland AIS Technologie für die Donau erstellt.

Der 210 km lange für die Großschifffahrt befahrbare Teil der Donau beinhaltet sechs Schleusen und einen navigatorisch schwierigen frei fließenden Abschnitt, geprägt durch unterschiedliche Wasserstände und wechselnde Engstellen. Inland AIS soll auch unter diesen Umständen seine Einsatzbarkeit zur Unterstützung des Schleusenmanagements, der Havarieabwicklung und der Datenfunk-Selbstwahrschau unter Beweis stellen.



Abbildung 8: Kammerbelegung Schleuse Würzburg

Schleusenmanagement

Die sechs Schleusenanlagen an der deutschen Donau werden lokal von je einem Steuerstand an der Schleuse bedient. Eine Schleusenanlage besteht in der Regel aus zwei Schleusenammern mit einer Länge von bis zu 230 m und bis zu 24 m Breite. Die Verkehrslage innerhalb der Schleusenammern und in den Schlu-

senkanälen wird durch Videoanlagen erfasst, der auf die Schleuse zulaufende Verkehr ist nicht sichtbar. Ein Schleusenzyklus, d. h. die Schleusung von unterer Haltung zur oberen Haltung und zurück zur unteren Haltung, dauert bis zu 2 Stunden.

Es scheint offensichtlich, dass eine sorgfältige Planung der Schleusenbelegung unter Berücksichtigung des zulaufenden Verkehrs sowohl Zeit- als auch Energieeinsparung für die zu schleusenden Schiffe bedeuten kann.

Das Schleusenmanagement kann durch die Bereitstellung eines Verkehrslagebildes des zulaufenden Verkehrs erheblich verbessert werden. Die Kenntnis über die aktuelle Position der sich nähernden Schiffe, deren Geschwindigkeit, Größe und deren Schiffstyp ermöglicht eine bessere Planung der Kammerbelegung und des Schleusenablaufs. Die erforderlichen Informationen dazu können durch das periodische Meldeverhalten der Inland AIS Bordgeräte bereitgestellt werden.

Havarieabwicklung

Alle Vorkommnisse auf der Wasserstraße werden an die zuständige Stelle gemeldet. Im Bedarfsfall kann Inland AIS die aktuelle Verkehrslage auf der Donau bereitstellen. Diese Informationen können entweder in einer Kartendarstellung oder vereinfacht in tabellarischer Form entsprechend der Schiffsposition auf der Wasserstraße dargestellt werden.

Datenfunk-Selbstwahrschau

Besonders im frei fließenden Abschnitt der Donau wird die Begegnungsabsprache per Selbstwahrschau häufig durchgeführt. Wegen ihres internationalen Charakters der Donauschifffahrt mit verschiedenen Sprachen und der anspruchsvollen Wasserstraße ist die Unterstützung der Selbstwahrschau durch Inland AIS von großem Interesse. Um Erfahrungen zu sammeln, soll die Verkehrssituation in den Engstellen auch in der Revierzentrale dargestellt werden.

Eine AIS Landinfrastruktur, bestehend aus sieben AIS Landstationen wird im Sommer 2014 aufgebaut werden um die oben genannten RIS Dienste zu unterstützen. Die empfangenen Daten werden in der Revierzentrale entsprechend dem Bedarf der Dienste integriert und dargestellt.

2.4.2 Aufbau der Inland AIS Landinfrastruktur an Bundeswasserstraßen

Das automatische Binnenschiffsidentifizierungssystem Inland AIS bezeichnet ein Funkverfahren zum automatischen Austausch von navigationsbezogenen Daten zwischen Schiffen sowie zwischen Schiffen und Landstationen. Inland AIS wurde zur Unterstützung der Navigation an Bord von Binnenschiffen und der Binnenschifffahrtswaterinformationssdienste (RIS) entwickelt.

Durch die zyklische Bereitstellung von schiffsbezogenen Daten informiert AIS über den Aufenthaltsort und die Identität des Schiffes, den Schiffstyp,

Fortschritte in der Informations- und Kommunikationstechnologie Binnenschifffahrtswirtschaftsinformationsdienste in Deutschland

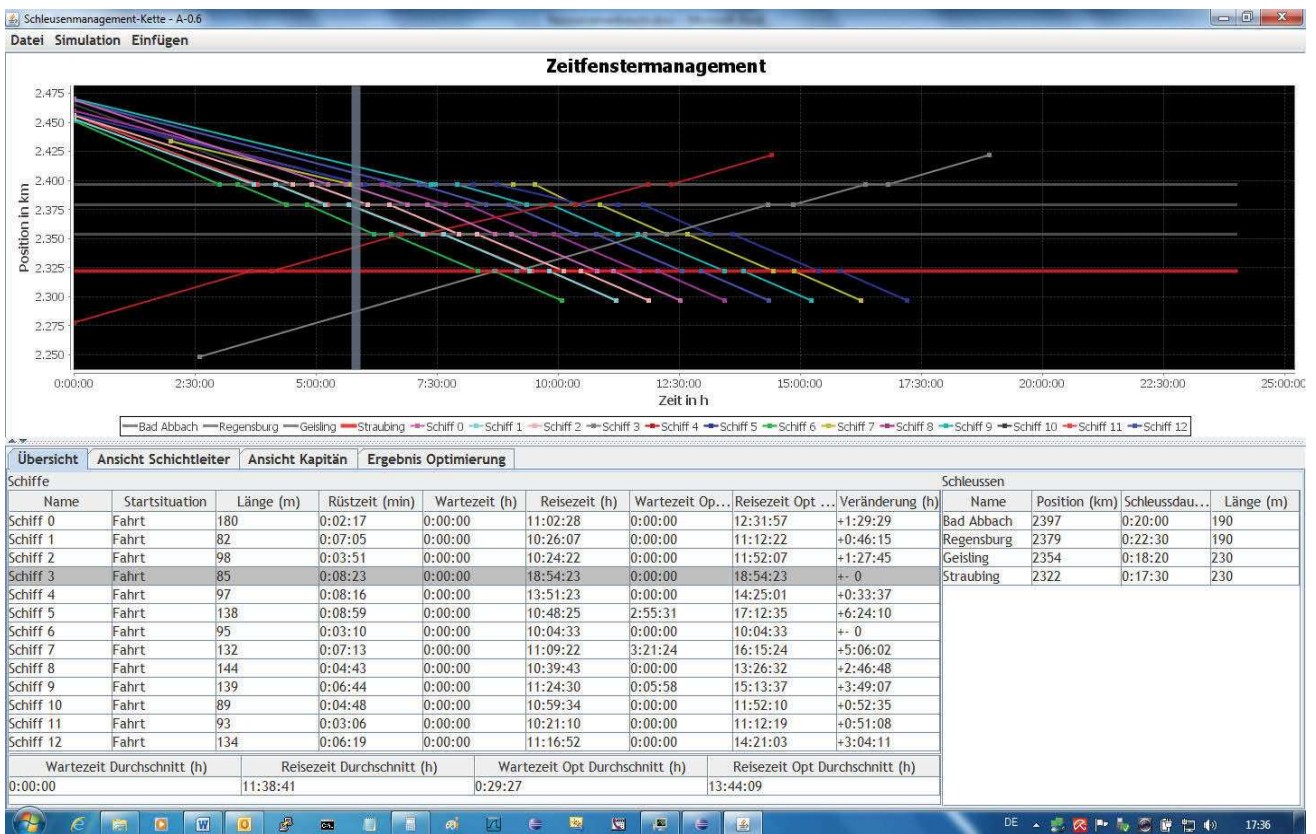


Abbildung 9: Optimierung Schleusenkette - Übersicht

über Abmessungen und Tiefgang sowie die Gefahrgutkategorie. Darüber hinaus können weitere navigationsbezogene Daten zwischen Land und Schiff ausgetauscht werden.

Da Informationsinhalt und Meldungsaustausch im Inland AIS standardisiert sind, können diese Daten auf einfache Weise an andere RIS-Dienste, die z. B. navigationsbezogene Schiffsdaten, ein Verkehrslagebild oder Informationen über Schiffsbewegungen benötigen, übergeben werden.

Inland AIS ist ein System zur Schiffsaufspürung und Verfolgung in der Binnenschifffahrt (Vessel Tracking and Tracing) und ist Teil der Binnenschifffahrtswirtschaftsinformationsdienste "River Information Services (RIS)". Es unterstützt unter anderem die Navigation an Bord, die landseitige Schifferfassung und Beobachtung sowie weitere Dienste wie Havarieabwicklung, VTS u. a.

Inland AIS basiert auf dem Klasse A AIS Mobilgerät für die Seeschifffahrt und wurde für den Einsatz in der Binnenschifffahrt entsprechend weiterentwickelt. Die notwendigen zusätzlichen Funktionen und Daten wurden ergänzend zu den bestehenden Funktionen entwickelt, um so die Kompatibilität zum AIS für die Seeschifffahrt beizubehalten.

Die Spezifikation des Inland AIS ist im Standard für Schiffsverfolgung und Aufspürung in der Binnenschifffahrt beschrieben, welcher von der Europäischen Kommission (EC), der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR) und der United Nation Economical Commission for Europe (UNECE) herausgegeben wird.

Ein Teststandard für Inland AIS mit technischen Anforderungen, Testabläufen und geforderten Ergebnissen wird von der ZKR veröffentlicht.

Ein Verfahren zur Typzulassung von Inland AIS Geräten wurde von der ZKR eingeführt. Seit 2008 sind typzugelassene Inland AIS Geräte verschiedener Hersteller am Markt verfügbar.

Implementierung von Inland AIS

Die PIANC RIS Empfehlungen (Guidelines and Recommendations for River Information Services) führen Inland AIS als Schlüsseltechnologie zur Schiffsidentifikation und Schiffsverfolgung in der Binnenschifffahrt auf.

Die Europäischen Kommission hat im der Rahmen der europäischen RIS-Richtlinie (EU Direktive 2005/44/EG) die Nutzung von Inland AIS für die harmonisierte Implementierung von RIS auf europäischen Binnenwasserstraßen weiterentwickelt.

Flusskommissionen wie die Zentralkommission für die Rheinschifffahrt, die Donaukommission und die United Nation Economical Commission for Europe (UNECE) haben Inland AIS in ihre Regularien aufgenommen.

Mehrere nationale Wasserstraßenverwaltungen, z. B. Österreich, Belgien, Frankreich, die Niederlande, Deutschland und andere haben, teilweise mit Unterstützung durch die Europäische Union, Förderprogramme zur Ausrüstung der Binnenschifffahrtsflotte mit Inland AIS aufgesetzt. Mit Hilfe dieser Fördermaßnahmen wurden ca. 8000 Binnenschiffe mit Inland AIS Geräten ausgestattet, davon etwa 1400 Binnenschiffe in Deutschland. Heutzutage ist die



Abbildung 10: Einführung von Inland AIS in Europa

Mehrheit der Binnenschifffahrtsflotte mit Inland AIS ausgestattet, viele davon auch in Verbindung mit einer elektronischen Binnenschifffahrtswaterkarte zur Darstellung der AIS Informationen, z.B. Inland ECDIS.

Um bordseitig als auch landseitig den vollen Nutzen des Inland AIS für unterschiedliche Binnenschifffahrtswaterinformationssysteme erzielen zu können, ist die flächendeckende Ausrüstung der gesamten auf den europäischen Binnenwasserstraßen verkehrenden Binnenschifffahrtsflotte eine wesentliche Voraussetzung. Verschiedene nationale Wasserstraßenverwaltungen bereiten in Zusammenarbeit mit den Flusskommissionen die Einführung einer Ausrüstungs- und Nutzungspflicht für Inland AIS auf europäischen Wasserstraßen vor. Österreich, Slowenien und Ungarn haben bereits die entsprechenden Regularien für ihre Wasserstraßen eingeführt.

Die Zentralkommission für die Rheinschifffahrt beabsichtigt zum Dezember 2014 die Pflichtausrüstung mit Inland AIS in Verbindung mit einer elektronischen Binnenschifffahrtswaterkarte für die gewerbliche Schifffahrt auf dem Rhein einzuführen. Es ist zu erwarten, dass die meisten europäischen Länder diesem Beispiel folgen werden und in absehbarer Zeit ebenfalls eine Pflichtausrüstung mit Inland AIS für ihre Wasserstraßen einführen.

In naher Zukunft wird die gesamte Binnenschifffahrtsflotte Inland AIS als Pflichtausrüstung nutzen. Dies wird den Schifffahrtsverwaltungen ermöglichen, RIS Dienste, welche Inland AIS voraussetzen, aufzubauen und zu betreiben.

Das deutsche AIS Netzwerk

Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung der Bundesrepublik Deutschlands erweitert zur Zeit ihre landseitige AIS Infrastruktur um die Erfassung der Binnenwasserstraßen. Deutschland hat bereits eine küstenweite AIS Landinfrastruktur aufgebaut, welche sich seit 2010 im operationellen Betrieb befindet. Die küstenweite AIS Landinfrastruktur deckt die gesamte deutsche Küste an Nord- und Ostsee einschließlich des Nord-Ostseekanals ab. Sie stellt Daten für unterschiedliche Dienste der Revierzentralen an der deutschen Küste zu Verfügung.

In 2010 hat die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung ebenfalls ein Pilotprojekt zur betrieblichen Erprobung von Inland AIS an der Mittelweser initiiert.

Das Projekt befasste sich mit der Unterstützung der Begegnungsabsprachen zwischen Schiffen an Engstellen durch Inland AIS in Verbindung mit einem elektronischen Binnenschifffahrtswaterkartensystem (Inland ECDIS). Im mäandrierenden Verlauf der Weser können sich Schiffe wegen engen Kurven, einschiffigen Engstellen und fortlaufenden Bauarbeiten nicht überall begegnen. Die Darstellung der das Eigenschiff umgebenden Verkehrslage durch Inland AIS auf einer elektronischen Binnenschifffahrtswaterkarte, dem Inland ECDIS, ermöglicht eine frühzeitige Erfassung des entgegenkommenden Verkehrs und somit eine entsprechend frühzeitige Begegnungsabsprache. Begleitend zu dieser betrieblichen Erprobung wurde auch eine technische Erprobung von Inland AIS Mobilgeräte und verbundene Dienste (Projekt TEAM) durchgeführt. Ziel des Projektes war die Ermittlung des geeigneten Weges zur Integration der Inland AIS

Landstationen in die vorhandenen technische RIS Landinfrastruktur.

Der Erfolg dieser Projekte ermutigte die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung zur Fortführung der Entwicklungen von Inland AIS und Inland ECDIS zur verbesserten Verkehrslagedarstellung an Bord von Binnenschiffen.

In Deutschland wird bis Ende 2014 eine AIS Landinfrastruktur an ausgewählten Binnenwasserstraßen der Kategorie A aufgebaut, das sind Rhein, Mosel, Main, Main-Donau Kanal, Donau, westdeutsches Kanalnetz und Mittelladkanal. Dadurch wird der verkehrsreichste Teil des deutschen Binnenwasserstraßennetzes mit einer Inland AIS Infrastruktur erfasst werden, was eine Vielzahl von bordseitigen und landseitigen RIS-Diensten ermöglichen wird. Zusammengefasst werden ca. 2400 km Binnenwasserstraße mit einer Inland AIS Landinfrastruktur abgedeckt werden.

Die über die Binnenwasserstraßen verbundenen Nachbarstaaten Deutschlands haben ebenfalls bereits eine AIS Landinfrastruktur aufgebaut oder sind dabei dies zu tun, das sind die Niederlande, Belgien, Luxemburg, Frankreich, Schweiz und Österreich. Schon in naher Zukunft können flächendeckende RIS-Dienste auf europäischen Binnenwasserstraßen angeboten werden.

Nutzung von Inland AIS auf deutschen Binnenwasserstraßen

Es kann zwischen zwei Hauptanwendungsfeldern von Inland AIS in Deutschland unterschieden werden:

- a) Navigationsunterstützung an Bord durch verbesserte Darstellung der das Eigenschiff umgebenden Verkehrslage
- b) Unterstützung von RIS-Diensten durch Inland AIS zur Erhöhung der Sicherheit und Leichtigkeit der Binnenschifffahrt und zum Schutz der Umwelt.

Navigationsunterstützung durch Inland AIS

Inland AIS in Verbindung mit einer elektronischen Binnenschifffahrtkarte, z. B. Inland ECDIS, liefert auf dem Navigationsdisplay an Bord ein Bild über die Wasserstraße und die umgebende Verkehrslage. Ein wesentlicher Vorteil von Inland AIS wird in der frühzeitigen Erfassung von entgegenkommenden Schiffen gesehen, besonders hinter Kurven oder außerhalb der Radarreichweite.

Voraussetzung zur möglichst vollständigen Verkehrslagedarstellung ist eine Pflichtausrüstung aller relevanten Fahrzeuge mit Inland AIS und einer elektronischen Binnenschifffahrtkarte. Die integrierte Mindestanzeige (MKD) des Inland AIS Gerätes ist dazu nicht ausreichend.

Vorteile der Nutzung von Inland AIS am Bord sind:

- Frühzeitiges Erfassen des entgegenkommenden Fahrzeuge, besonders hinter einer Kurve oder außerhalb des Radarbereiches;

- Frühzeitige Planung der Passage durch rechtzeitiges Erkennen der Verkehrslage, besonders wichtig in geographisch schwierigen Gelände (Kurven) und bei schnellen oder hohem Verkehrsaufkommen;
- Effektives Steuern des Fahrzeuges durch eine bessere Bewertung der Verkehrslage, z. B. kann der Schiffsführer stockenden Verkehr oder Wartezeiten vor Schleusen durch Anpassen der Schiffsgeschwindigkeit vermeiden (Energieersparnis). Dies kann durch zusätzliche Informationen, z. B. vom Schleusenmanagement, weiter unterstützt werden;
- Unterstützung des UKW Sprechfunkverkehrs an Bord durch einfache und eindeutige Identifizierung anderer Schiffe. Name und Position der anderen Fahrzeuge werden auf der elektronischen Binnenschifffahrtkarte eindeutig angezeigt;
- Unterstützung der Begegnungsabsprache zwischen Fahrzeugen in Engstellenbereichen durch frühzeitige Erkennen und Identifizieren von entgegenkommenden Fahrzeugen;
- Unterstützung bei der Absprache der Steuerbordbegegnung durch Anzeige der Blauen Tafel auf der elektronischen Binnenschifffahrtkarte an Bord. Dadurch kann die Blaue Tafel unabhängig von Witterungsbedingungen und in größeren Entfernungen erkannt werden;
- Möglichkeit der Unterstützung des Liegeplatzmanagements durch Erfassung bereits belegter Liegeplätze mittels Inland AIS.

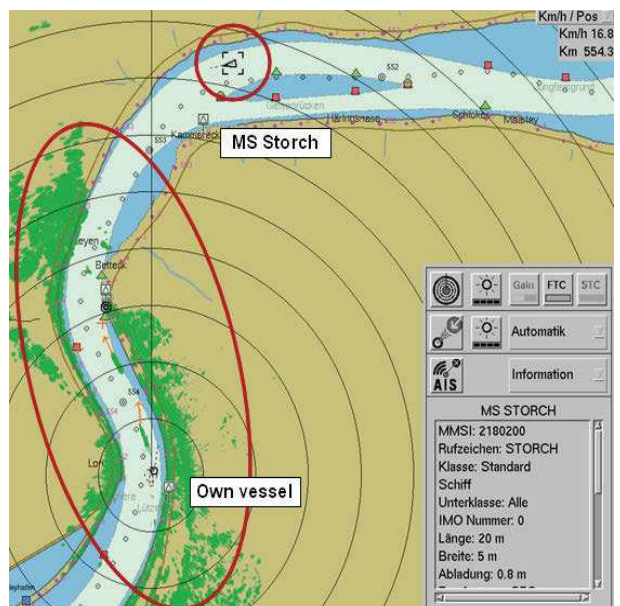


Abbildung 11: Blick um die Kurve, entgegenkommendes Fahrzeug außerhalb der visuellen Sicht und des Radarbereiches (grüne Farbe)

Landseitige AIS Repeater können die Funkreichweite der Inland AIS Bordgeräte erheblich erweitern. Besonders im kurvigen Verlauf eines Flusses oder Kanals kann die Funkreichweite auf wenige Kilometer begrenzt sein, verursacht z.B. durch Funkabschattungen durch Berge, Gebäude usw. AIS Repeater ermöglichen die

Überbrückung dieser Funkabschattungen, so dass Schiffe auch schon in größerer Entfernung erfasst und identifiziert werden können. AIS Repeater haben jedoch einen erheblichen einschränkenden Einfluss auf die Übertragungskapazität der Funkkanals, so dass sie nur dort eingesetzt werden sollten, wo dies zur Sicherstellung des Schiff-zu-Schiff Datenaustausch unbedingt erforderlich ist.

Inland AIS Bordgeräte senden nur Daten aus, die für die Navigationsunterstützung notwendig sind. Informationen wie Name, Größe, Position, Kurs und Geschwindigkeit des Fahrzeuges sind für die Navigationsunterstützung unverzichtbar. Um Bedenken zum Schutz der Privatsphäre und zum Datenschutz Rechnung zu tragen werden Informationen wie Zielhafen oder Gefahrgutkategorie nicht verpflichtend gefordert.

Unterstützung von RIS-Diensten durch Inland AIS

Auch wenn für den Betrieb von Inland AIS keine Landinfrastruktur erforderlich ist, gibt es eine Vielzahl von landseitigen Anwendungen die von den Inland AIS Informationen profitieren können.

In Revierzentralen, Schleusenleitstellen und anderen Betriebsstellen liefert Inland AIS Daten um bei Entscheidungen auf zuverlässige Positionsinformationen von Fahrzeugen zurückgreifen zu können und um die Kommunikation zwischen den Betriebsstellen und den Schifffahrtstreibenden zu erleichtern.

Inland AIS kann zur Unterstützung der Aufgabenerledigung in folgenden Bereichen eingesetzt werden:

- Schleusen- und Engstellenmanagement
- Verkehrsinformation und -überwachung
- Havarievorsorge und Unfallmanagement sowie
- für Statistikzwecke.

Darüber hinaus können aber auch folgende Dienste/Aufgaben unterstützt werden:

- Meldemanagement,
- Abgabenerhebung,
- Managementdienst zur Fahrriinnenoptimierung.

Es besteht ebenfalls die Möglichkeit, digitale Informationen an mit Inland AIS Bordgeräten ausgestatteten Schiffen zu senden, und zwar „An Alle“ bzw. gezielt an „bestimmte Fahrzeuge“, um z. B. die Schifffahrt über kurzfristige Wasserstraßensperrungen zu informieren. Diese können dann in einer an das Inland AIS Gerät angeschlossenen Inland ECDIS-Applikation an Bord angezeigt werden.

Folgende RIS Dienste werden durch die AIS Landinfrastruktur unterstützt:

- Verkehrserfassung in der Revierzentral Oberwesel – zur Unterstützung der RADAR-Beobachtung in der Gebirgsstrecke des Rheins;
- Verkehrsinformation – zur Ermittlung der aktuellen Verkehrslage und zur Aussendung von Sicherheitsbezogenen Meldungen über AIS;

- Schleusenmanagement – zur Unterstützung der operative Schleusenplanung und zur Ermöglichung von Rückmeldung bezüglich der geforderten Ankunftszeit des Fahrzeuges an der Schleuse zur Vermeidung von Wartezeiten;
- Havarieabwicklung – zur Bereitstellung von Informationen über betroffene Schiffe und die aktuelle Verkehrslage am Unfallort;
- Wasserstraßenstatistik – zur Bereitstellung von Informationen über den Verkehr und die Nutzung der Wasserstraße;
- Schiffsmeldung – zur Vereinfachung der Meldungen über UKW Sprechfunk an Meldepunkten durch die automatische Bereitstellung der Schiffsposition;
- Wasserstraßenabgaben – ermöglicht das Nachvollziehen des exakten Fahrtweges und somit einen automatischen Abrechnungsprozess;
- Analysen zur Fahrriinnenoptimierung – stellt Daten über den Verkehrsfluss, die Fahrzeugcharakteristik (z. B. Fahrzeuggröße) und die Nutzung der Fahrriinne für den Ausbau der Fahrriinne zur Verfügung;

Anmerkung: keiner der oben genannten RIS-Dienste nutzt Inland AIS als alleinige Datenquelle. Inland AIS stellt jedoch nützliche Zusatzinformationen zur vereinfachten und verbesserten Dienstleistung zur Verfügung.

Die Funktionsweise des Inland AIS Dienstes kann wie folgt zusammengefasst werden. AIS Landstationen an der Wasserstraße empfangen die Meldungen von den AIS Bordgeräten und können Meldungen an diese aussenden. Die von den AIS Landstationen empfangenen Meldungen werden an einen AIS Server weitergeleitet, dort gespeichert, verarbeitet und für andere RIS-Dienste aufbereitet und an dies weitergeleitet. Informationen die an die Inland AIS Bordgeräte auf den Fahrzeugen ausgesendet werden sollen, werden von den RIS Diensten an den AIS Server übergeben, dort zur Aussendung aufbereitet und dann vom AIS Server an die entsprechenden AIS Landstation zur Aussendung weitergeleitet. Die Funktionalität des AIS Servers wird auch als Logische AIS Landstation bezeichnet.

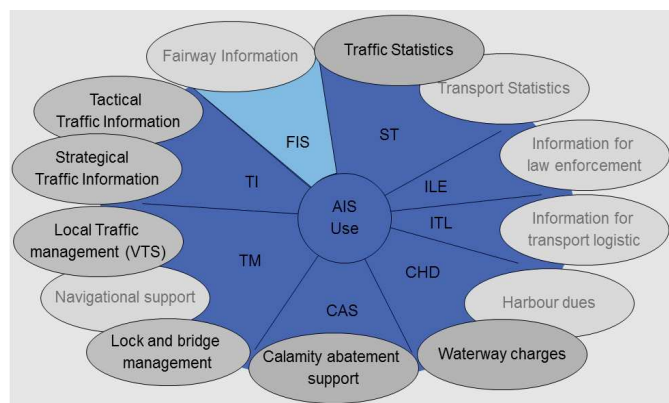


Abbildung 12: Nutzung von Inland AIS in den verschiedenen RIS Diensten in Deutschland

Technische Implementierung der Inland AIS Landinfrastruktur in Deutschland

Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung hat den Aufbau einer Inland AIS Landinfrastruktur zur Abdeckung der Binnenwasserstraßen der Kategorie A beauftragt. Die Inland AIS Landinfrastruktur umfasst die Binnenwasserstraßen Rhein, Mosel, Main, Main-Donau Kanal, Donau, westdeutschen Kanalnetz und Mittelladkanal. Diese Binnenwasserstraßen tragen das höchste Güteraufkommen und verbinden die deutschen Wirtschaftszentren mit den Seehäfen und dem angrenzenden Wasserstassen der Nachbarländer.

Die deutsche Inland AIS Landinfrastruktur wird entsprechend den Empfehlungen der IALA „Recommendation A-124 on the shore based AIS Service“ aufgebaut.

Die Inland AIS Landinfrastruktur wird ca. 2400 km Binnenwasserstraße abdecken. Sie besteht aus 86 Inland AIS Landstationen entlang der Wasserstraßen, 9 AIS Repeaterstationen zur Erweiterung der Funkreichweite Schiff – Schiff in bestimmten Gebieten und 4 regionale AIS Server in den Revierzentralen Minden, Duisburg, Oberwesel und Gösseltalmühle. Die regionalen Server stellen die Logischen AIS Landstationen zur Verfügung, welche die funktionalen Schnittstellen zu anderen RIS Diensten wie VTS oder Schleusenmanagement darstellen. Die Funkabdeckung der einzelnen Inland AIS Landstationen ergeben zusammengenommen eine flächendeckende Funkabdeckung der betroffenen Binnenwasserstraßen. Inland AIS und UKW Sprechfunk sind beides Funkdienste im UKW Bereich, welche vergleichbaren Ausbreitungsverhältnissen unterliegen. Aus diesem Grund wird die existierende Infrastruktur des Nautischen Informationsfunks (NIF) auch für die aufzubauende Inland AIS Landinfrastruktur genutzt. Die meisten Inland AIS Landstationen sind an vorhandenen Standorten des Nautischen Informationsfunks an der Wasserstraße kolloziert. Die Inland AIS Landstationen nutzen vorhandene Infrastruktur wie Antennenträger, Gebäude, Energieversorgung oder landseitige Datenübertragungswege. Die Datenverarbeitung erfolgt ausschließlich in den regionalen AIS Zentralen (AIS Server).

AIS Repeater werden in einigen wenigen Gebieten eingesetzt bei denen durch die topologischen Verhältnisse nur eine eingeschränkter Schiff zu Schiff Funkreichweite vorhanden ist, z. B. in Gebirgsrhein und an Wasserstraßen mit sehr langen einschiffig befahrbaren Engstellen. Repeater ermöglichen einen Schiff zu Schiff Datenaustausch in diesen Gebieten. Die Repeater Stationen sind redundant aufgebaut, um eine hohe Verfügbarkeit zu gewährleisten. Ein Gebietsfilter beschränkt die Wiederaussendung (repeat) der Meldungen auf ein definiertes Gebiet aus welchem solche Meldungen von Interesse sind. Ein Meldungsfilter reduziert die Häufigkeit der Wiederaussendung auf das notwendige Minimum. Beide Filter sind notwendig, um die unnötige Erhöhung der Funkkanallast des AIS Funkkanals (AIS VDL) zu vermeiden.

Die Inland AIS Landstationen liefern Daten zu, bzw. erhalten Daten vom dem AIS Server in der für sie

zuständigen regionalen AIS Zentrale. Die Zuordnung der Inland AIS Landstation zu den regionalen AIS Zentralen erfolgt gebietsbezogen. Die AIS Server sind redundant aufgebaut, auf ihnen wird die AIS Logische Landstation betrieben, welche die Schnittstelle zu anderen RIS-Diensten darstellt. Die gesamte Datenverarbeitung wie Filterung, Datenaufbereitung und Speicherung erfolgt in der AIS Logischen Landstation des regionalen AIS Servers. Die Schnittstelle der AIS Logische Landstation ermöglicht die Übergabe von durch die AIS-Landinfrastruktur empfangener Meldungen an andere RIS-Dienste sowie die Übernahme von auszusendenden Meldungen von anderen RIS-Diensten an einzelne oder alle Schiffe in einem Gebiet, welche dann von den entsprechenden Inland AIS Landstationen ausgesendet werden. Darüber hinaus enthält der regionale AIS Server eine Meldeintervallüberwachung für alle AIS Stationen im Erfassungsgebiet, ein Konfigurationswerkzeug für alle Komponenten der Inland AIS Landinfrastruktur sowie deren Statusanzeige. Das Konfigurationswerkzeug und Statusanzeige erlauben einen Remote-Zugang für das technische Betriebspersonal.

Eine zentrale technische Auswertestation für detaillierte Untersuchungen und Auswertungen sowie für die Weiterentwicklung des Inland AIS vervollständigt die Inland AIS Landinfrastruktur.

Die Inland AIS Landinfrastruktur soll Mitte 2015 den operationellen Betrieb aufnehmen.

2.5 Rechtliche Aspekte

Neben der Ausstattung der Schifffahrt sind insbesondere rechtliche Aspekte zu berücksichtigen, die mit der Einführung einer Ausrüstungs- und Einschaltspflicht und der landseitigen Nutzung von Inland AIS verbunden sind.

Größte Aufmerksamkeit ist dem Datenschutz zu widmen, da alle Daten, die mittels Inland AIS übertragen werden, nicht verschlüsselt werden können. Andernfalls könnten weder alle Schiffe untereinander noch die Wasserstraßenverwaltungen mit allen Schiffen bzw. umgekehrt kommunizieren. Eine Verwaltung, die eine Ausrüstungs- und Einschaltspflicht für Inland AIS Geräte einzuführen beabsichtigt, muss daher sicherstellen, dass der Empfang von Inland AIS – Informationen nur für bestimmte Nutzungen und Nutzer erlaubt ist.

2.6 Weiteres Vorgehen

Die Ausrüstung der Schifffahrt mit Inland AIS und Inland ECDIS geht voran. Durch die Unterstützung mit den Förderprogrammen sind am Rhein bisher über 95 % der aktiven europäischen Binnenschifffahrtsflotte mit Inland AIS ausgerüstet. Auch wenn die Ausrüstungsprogramme nicht ausdrücklich die Verknüpfung mit Inland ECDIS gefordert haben, so ist dies doch die effektivste Möglichkeit, um an Bord Inland AIS zur Unterstützung der Navigation zu nutzen.

Fortschritte in der Informations- und Kommunikationstechnologie

Binnenschiffahrtswasserstraßenverkehrsinfrastruktur in Deutschland

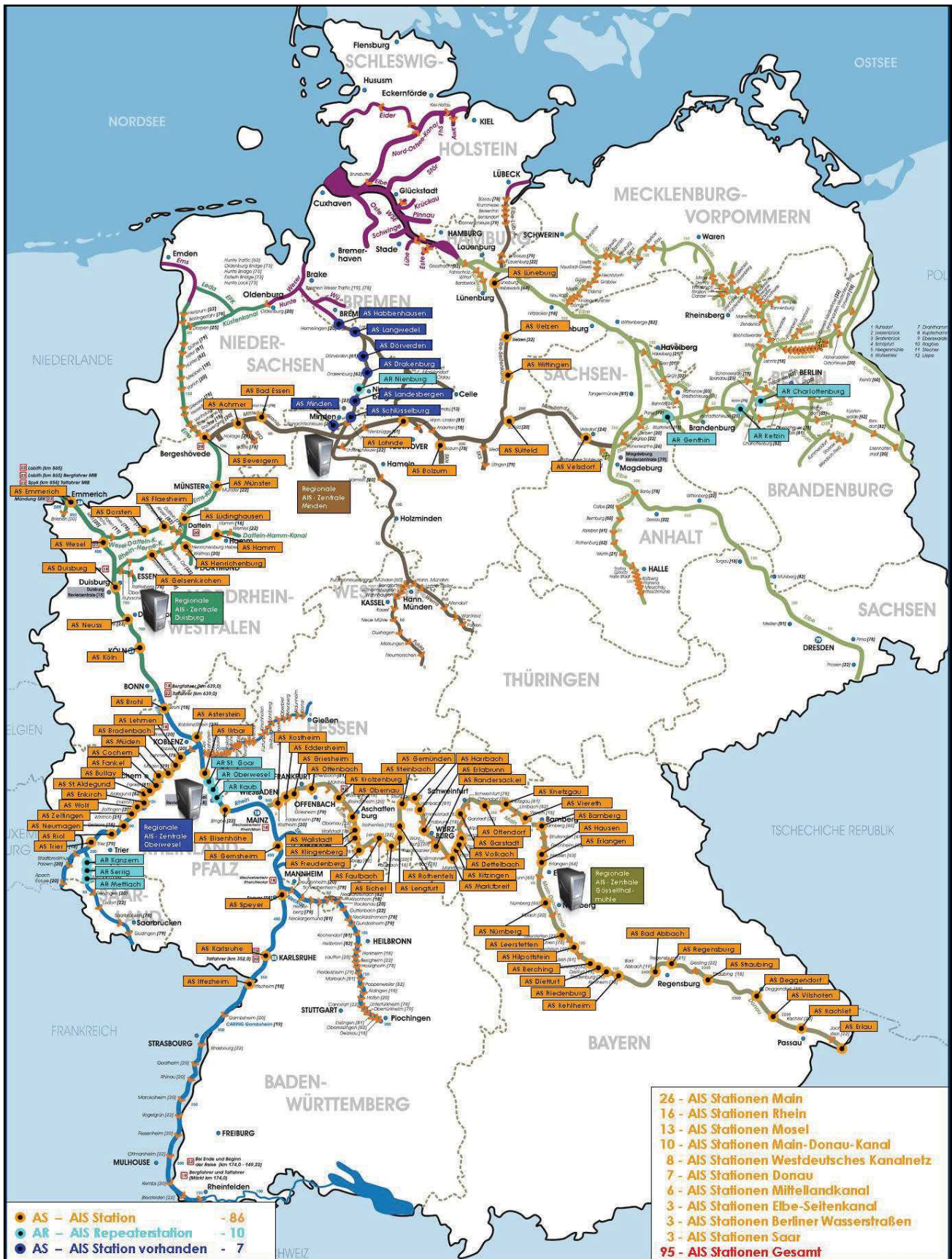


Abbildung 13: AIS Landinfrastruktur

2.6 Weiteres Vorgehen

Die Ausrüstung der Schifffahrt mit Inland AIS und Inland ECDIS geht voran. Durch die Unterstützung mit den Förderprogrammen sind am Rhein bisher über 95 % der aktiven europäischen Binnenschifffahrtsflotte mit Inland AIS ausgerüstet. Auch wenn die Ausrüstungsprogramme nicht ausdrücklich die Verknüpfung mit Inland ECDIS gefordert haben, so ist dies doch die effektivste Möglichkeit, um an Bord Inland AIS zur Unterstützung der Navigation zu nutzen.

Eine intensive Nutzung von Inland AIS zur Unterstützung der Selbstwahrnehmung wird erwartet, um den hohen Standard der Sicherheit und Leichtigkeit auf der Wasserstraße trotz wachsendem Verkehrsaufkommen und einem höheren Anteil an größeren Schiffen zu bewahren. Dies erfordert die Ausrüstung der Binnenschiffe sowohl mit Inland AIS als auch mit Inland ECDIS und, zur elektronischen Signalisierung der Steuerbordpassage, den Anschluss der Blauen Tafel an das Inland AIS Gerät.

Ebenso werden auch die Binnenschifffahrtswirtschaftsinformationsdienste von Inland AIS profitieren. Die automatische Positionsmeldung durch Inland AIS wird z. B. die Arbeit des Betriebspersonals für Schiffs-meldesysteme, Havarieabwicklung und Gebührenerhebung erleichtern. Binnenschifffahrtswirtschaftsinformationsdienste könnten somit, ohne zusätzlichen Personalbedarf, auf heute noch nicht versorgte Wasserstraßen ausgeweitet werden.

Andere Binnenschifffahrtswirtschaftsinformationsdienste, die durch Inland AIS unterstützt werden, sind Verkehrs-informationsdienste, Verkehrsmanagementdienste, Schleusenmanagement als auch Statistik.

Anwendung von Inland AIS in Revierzentralen

In heutigen Revierzentralen wird meist Radar zur Erfassung der Verkehrslage in kritischen Bereichen der Wasserstraße eingesetzt. Das Radarbild wird in der Revierzentrale von Operateuren beobachtet und ausgewertet und dient zur Unterstützung der Schifffahrt in besonders schwierig befahrbaren Wasserstraßenabschnitten.

In Ergänzung zur Radarinformation liefert Inland AIS Daten wie Schiffsidentität, Schiffstyp, Länge und Breite. Diese Daten können entsprechend weiterverarbeitet, ausgewertet und gespeichert werden. Die Nutzung von Inland AIS wird die Qualität des Verkehrslagebildes verbessern und den Operateur in der Revierzentrale entlasten.

Aber auch unabhängig von Radar kann Inland AIS ein Verkehrslagebild liefern. AIS Landstationen empfangen die Daten der ausgestatteten Schiffe, welche z. B. auf einer elektronischen Flusskarte oder in tabellarischer Form in der Revierzentrale dargestellt werden können. Voraussetzung dazu ist jedoch eine möglichst vollständige Ausstattung aller relevanten Fahrzeuge mit Inland AIS Geräten.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit mittels Inland AIS Informationen von der Revierzentrale an die Schifffahrt zu übertragen. Diese Informationen können dann z. B. auf dem bordseitigen Navigationsdisplay

dargestellt werden. Ein Beispiel ist die Aussendung des Signalstatus von Lichtsignalanlagen an der Wasserstraße über Inland AIS. Dadurch kann der Signalstatus in der bordseitigen Inland ECDIS dargestellt werden, unabhängig von den Sichtverhältnissen außerhalb der Schiffsbrücke.

Wasserstraßen-Benutzungsgebühren

Auch wenn Inland AIS gebührenfrei funktioniert und keine Kosten für die Kommunikation entstehen, die Nutzung der Wasserstraße ist zum Teil gebührenpflichtig. Inland AIS stellt auf elektronischem Wege Daten zur Verfügung, die eine genaue Berücksichtigung des gefahrenen Weges erlauben. Somit ließe sich die Gebührenabrechnung weitgehend automatisieren.

3. Ausblick

Effiziente und sichere Schifffahrt auf Binnenwasserstraßen und anderswo kann zukünftig wesentlich gesichert und verbessert werden, wenn Informationssysteme, wie die oben beschriebenen, entwickelt, eingeführt und, um den wechselnden Anforderungen zu genügen, aktuell gehalten werden. Die deutsche Wasser- und Schifffahrtsverwaltung – in Kooperation mit den Nachbarverwaltungen und im Kontext internationaler Aktivitäten wie die von PIANC – erprobt und nutzt die verschiedenen Möglichkeiten der Informationstechnologie, um diese Anforderungen zu erfüllen. Es ist Teil unserer Bemühungen die Schifffahrt als sicheres und umweltfreundliches Transportmittel zu festigen, in einer Welt, die mehr und mehr von lokalem, regionalem und globalem Handel abhängig wird. Binnenschifffahrtswirtschaftsinformationsdienste stellen aus dieser Sicht einen großen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Binnenschifffahrt dar.

Verfasser

Dipl.-Ing. Nils Braunroth

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Referat WS12
Robert-Schuman-Platz 1
53175 Bonn
Tel.: 0228/300-4227
E-Mail: Nils.Braunroth@bmvi.bund.de

Dipl.-Ing. Stefan Bober

Fachstelle der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes für Verkehrstechniken
Am Berg 3
56070 Koblenz
Tel.: 0261/9815-2231
E-Mail: Stefan.Bober@wsv.bund.de

Virtuelle Navigation für Binnenschiffe in Fließgewässern

Dipl.-Ing. Alexander Lutz

Universität Stuttgart, Institut für Systemdynamik,
Stuttgart

Dipl.-Ing. Thorsten Dettmann

Bundesanstalt für Wasserbau, Koblenz

Dipl.-Ing. Rolf Zentgraf

Bundesanstalt für Wasserbau, Koblenz

Zusammenfassung

Virtuelle Navigation ermöglicht die Automatisierung der Untersuchung der Befahrbarkeit von Wasserstraßen, indem Leitlinien aus Eigenschaften der Wasserstraßen generiert werden, welchen anschließend mit Hilfe automatischer Bahnführung in der Simulation nachgefahren wird. Dieses Vorgehen eliminiert den menschlichen Faktor in der Bewertung der Befahrbarkeit von Wasserstraßen. Mit derartiger virtueller Navigation können verschiedene mögliche Ausbauvarianten leicht evaluiert und miteinander verglichen werden. Zukünftig kann ein solches System möglicherweise individuelle Leitlinien für die unterschiedlichen Schiffe in einer Art und Weise generieren, dass diese optimal im Sinne eines minimalen Treibstoffverbrauchs sind. Solche Berechnungen könnten Schiffsführern in der Zukunft als Dienst angeboten werden.

Einleitung

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ist eine technisch-wissenschaftliche Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) in Deutschland. Die BAW hat ihren Sitz in Karlsruhe. Eine weitere Dienststelle befindet sich in Hamburg. Die BAW ist der zentrale Dienstleister für die Beratung und Unterstützung des Ministeriums und der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) im Rahmen ihrer verkehrswasserbaulichen Aufgaben, insbesondere deren bauaufsichtliche Verantwortung dafür, dass alle Anlagen und Einrichtungen der Bundeswasserstraßen den Anforderungen von Sicherheit und Ordnung genügen. Die BAW trägt wesentlich dazu bei, dass die Wasserstraßen in Deutschland den wachsenden technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Anforderungen gerecht werden. Die BAW verfügt über eine umfassende Kompetenz und Erfahrung auf dem Gebiet des Verkehrswasserbaus und ist maßgeblich an der Weiterentwicklung dieser Disziplin beteiligt.

Im Bereich Wasserbau werden projektbezogene Untersuchungen unter Anwendung von Naturuntersuchungen sowie physikalischen und mathematischen Modellen durchgeführt. Als Ergebnis werden Prognosen als Entscheidungsgrundlagen sowohl für Unterhaltungs- und Ausbauplanungen (z. B. Strombaukonzepte, hydraulisch und morphologisch optimierte Wasserbauwerke, Fahrrinnenabmessungen) als auch für den wirtschaftlichen Betrieb der natürlichen und künstlichen Wasserstraßen bereitgestellt. Eine Aufgabe ist es, im Zuge von Baumaßnahmen an den Wasserstraßen bzw. der Zulassung neuer Schiffsabmessungen vorab zu untersu-

chen, ob die Sicherheit und Leichtigkeit für die Schiffsverkehr weiterhin gewährleistet bleiben.

Schiffsführungssimulator als wasserbauliches Werkzeug

Die Bundesanstalt für Wasserbau setzt für derartige Untersuchungen einen Schiffsführungssimulator ein. Dieser Simulator besteht aus zwei Brücken und einem Instruktorarbeitsplatz (Abbildung 1). Da hier ausschließlich verkehrswasserbauliche Untersuchungen durchgeführt werden und keine Ausbildung für das nautische Personal von Binnenschiffen stattfindet, konnte das Sichtsystem auf drei Monitore reduziert werden. Instrumente, welche den Status des Schiffes anzeigen, werden generisch auf Bildschirmen dargestellt. Dies erhöht die Flexibilität der Anlage, so dass unterschiedlichste Schiffstypen mit unterschiedlichen Antriebssystemen simuliert werden können. Wichtig für Simulationen, bei denen das Schiff durch einen Schiffsführer gesteuert wird, ist, dass die Bedienelemente und das Radargerät originale Instrumente sind. Um den subjektiven Einfluss durch den Menschen bei Bedarf sicher ausschalten zu können, ist zusätzlich vorgesehen, das Schiff durch einen Autopiloten steuern zu lassen. Damit wird sichergestellt, dass durch wiederholtes Fahren kein Lerneffekt beim Menschen die Ergebnisse der Simulation beeinflusst. Unterschiedliche Ausbauvarianten können direkt miteinander objektiv verglichen und bewertet werden.



Abbildung 1: Schiffsführungssimulator der BAW

In Vorbereitung von Untersuchungen mit dem Schiffsführungssimulator werden die entsprechenden Fahrtreviere mit zugehöriger Unterwassertopografie erstellt. Für Simulationsfahrten nach Sicht bzw. Radar werden Objekte wie Bebauung, Vegetation, Fahrrinnenbegrenzungstonnen, Signalstellen etc. dreidimensional modelliert und entsprechend texturiert.

Die flussbauliche Bewertung einschließlich der kurz- und langfristigen morphologischen Entwicklung erfolgt in der BAW unter Anwendung von physikalischen sowie mathematisch-numerischen Modellen, bei denen das Abflussgeschehen in einem Fließgewässer simuliert wird. Dafür entwickelt und betreibt die BAW zweidimensionale hydrodynamisch-numerische (2D-HN-) Modelle, die für unterschiedliche Szenarien hoch aufgelöste Wasserstands- und Abflussströmungsfelder liefern.

Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Sohldaten aus dem 2D-HN-Modell, welche in der Inland ENC ergänzt und dem Simulator bereitgestellt wurden. Dadurch ist für die Schiffsführungssimulation eine detaillierte Beschreibung

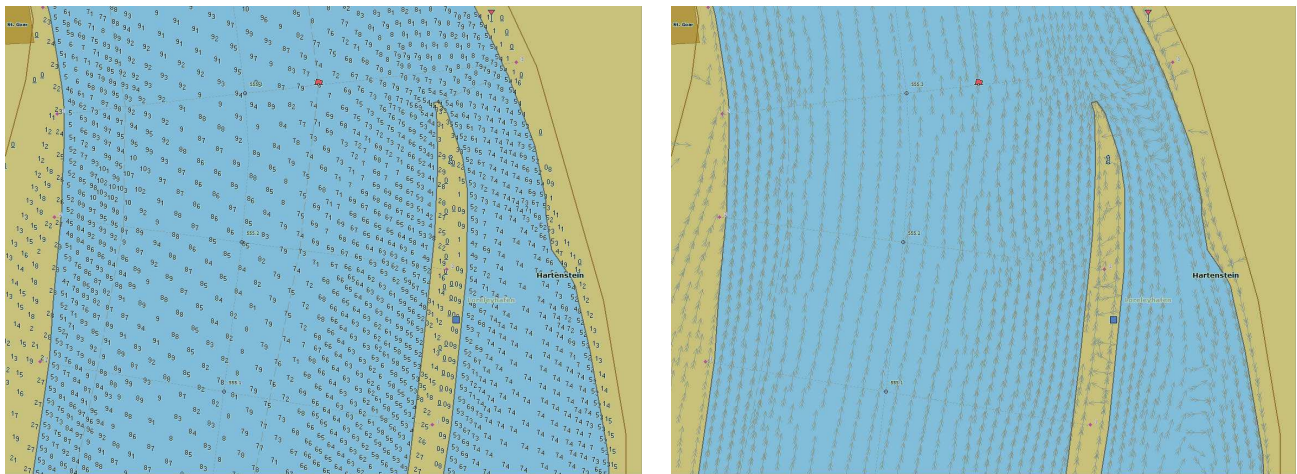


Abbildung 2: Sohldaten und tiefengemittelte Strömungsdaten in der Inland ENC

der Unterwassergeometrie ermöglicht worden. Die tiefengemittelten zweidimensionalen Strömungsfelder aus dem Modell werden ebenfalls in die Inland ENC mittels definierter Objekte integriert.

Für die eigentlichen verkehrswasserbaulichen Untersuchungen werden die Schiffe durch das so aufgebaute Fahrtrevier navigiert. Dies geschieht wie beschrieben mit Schiffsführern, die über die notwendigen Streckenkenntnisse in dem zu untersuchenden Wasserstraßenabschnitt verfügen. Andererseits wird für eine objektive Bewertung das Schiff durch einen virtuellen Schiffsführer gesteuert wird. Die virtuelle Navigation besteht grundsätzlich aus zwei Verfahren. Ein Verfahren ermittelt die Leitlinie, die den optimalen Kurs durch das Gewässer angibt. Das zweite Verfahren ist ein Regelkreislauf, der gewährleistet, dass das Schiff dieser Leitlinie folgt.

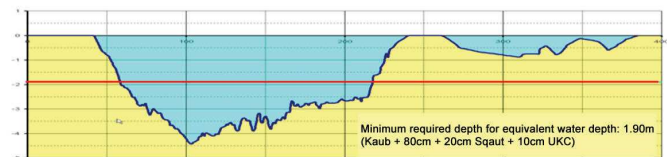


Abbildung 3: Querprofil bei Rhein km 551,3 für Pegel Kaub gleich 1,90 m



Abbildung 4: Definition eines Tiefenpotenzials im Flussprofil

Virtuelle Navigation

Bewertung des Flusses mit Hilfe von Befahrbarkeitspotenzialen

In natürlichen Wasserstraßen mit starken Strömungsgeschwindigkeiten müssen die Schiffsführer auf die Strömung und die morphologischen Eigenschaften des Flusses reagieren. Dadurch ist es nicht möglich, eine Leitlinie vorzugeben, ohne die Eigenschaften des Flusses zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wurde ein Verfahren entwickelt, welches die Leitlinien unter Berücksichtigung der durch das Fließgewässer vorgegebenen Randbedingungen automatisch konstruiert.

Für die Entwicklung der Leitlinien werden für das Fahrtrevier Befahrungsregeln aufgestellt. Diese beruhen auf Gewässerdaten, Verkehrsvorschriften, Gewohnheiten der örtlichen Schifffahrt und den nautischen Eigenschaften des Schiffes. Im derzeitigen Arbeitsstadium wird der zu untersuchende Flussabschnitt in Querprofile unterteilt. In einem ersten Schritt werden in jedem Querprofil die Bereiche ermittelt, die tief genug sind, damit das Schiff dort fahren kann. Am Beispiel des Querprofiles am Rhein bei km 551,3 am Jungfergrund soll erläutert werden, wie die Beurteilung erfolgt. Gefordert wird eine Mindesttiefe von 1,90 m (Abbildung 3). Die rote Linie markiert die geforderte Mindestwassertiefe.

Dadurch wird der Teil des Flusses ersichtlich, der für das vorgegebene Bemessungsschiff mit dem entsprechenden Tiefgang grundsätzlich befahrbar ist. In einem weiteren Schritt muss ein Verfahren entwickelt werden, welches es ermöglicht, die Wasserstraße hinsichtlich der Befahrbarkeit zu bewerten. Damit unterschiedliche Parameter wie Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, Verkehrsregeln etc. einer einheitlichen Bewertung unterzogen werden können, wird der Begriff des Befahrbarkeitspotenzials eingeführt. Als Beispiel wird die in Abbildung 3 dargestellte Wassertiefenverteilung im Querprofil in Befahrbarkeitspotenziale umgewandelt. Zu diesem Zweck werden die Tiefen auf Werte zwischen 0 und 100 normiert. Wassertiefen unter der geforderten Mindesttiefe, im Beispiel unter 1,90 m, erhalten den Potenzialwert 0. Wassertiefen mit der geforderten Mindesttiefe erhalten den Wert 1, und die maximale Tiefe bekommt den Wert 100. Die Umrechnung der Zwischenwerte erfolgt linear. Danach ergibt sich aus dem Querprofil das in Abbildung 4 im oberen Teil dargestellte Tiefenpotenzial.

Mit Hilfe dieses Tiefenpotenzials kann die Befahrbarkeit eines Querprofiles schon sehr einfach bewertet werden. Bereiche mit dem Wert 0 sind nicht befahrbar. Mit wachsender Wassertiefe wird der Schiffswiderstand kleiner. Das bedeutet, je größer der Wert des Tiefenpotenzials ist, umso besser ist das Profil in diesem Bereich befahrbar.

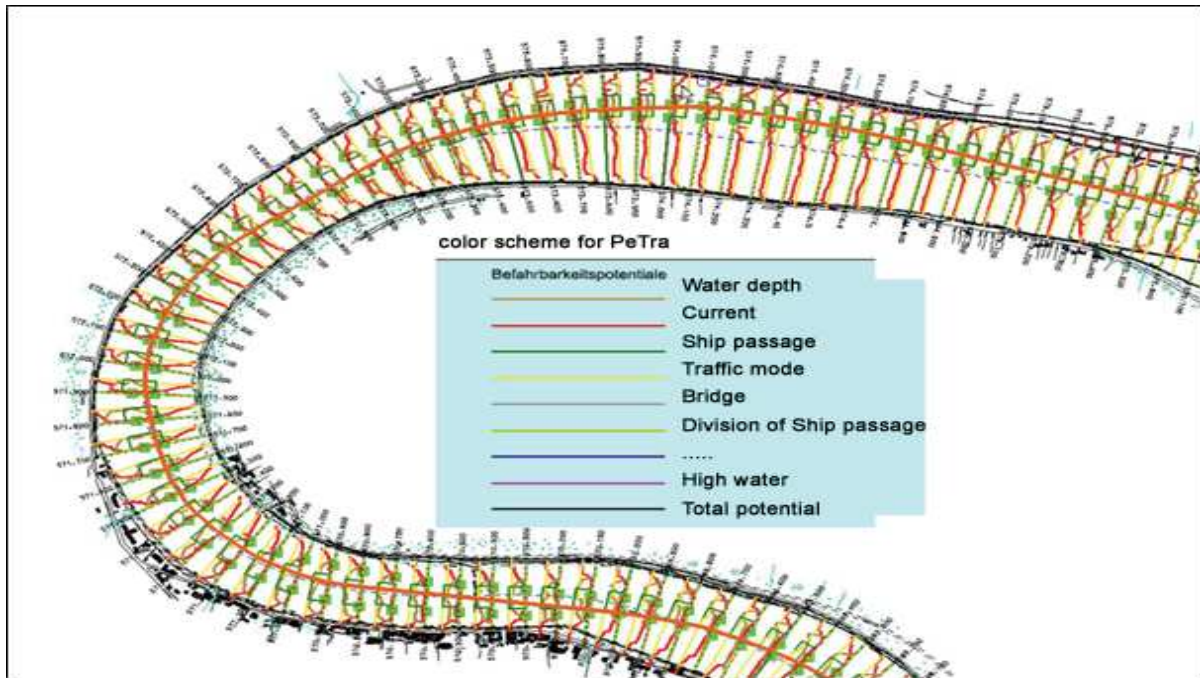


Abbildung 5: Profilpotenziale entlang des Rheins zwischen Rh km 569 bis Rh km 575

Nach dem gleichen Prinzip wird die Fließgeschwindigkeitsverteilung innerhalb des Flussprofils bewertet. Allerdings wird hier unterschieden, ob das Schiff zu Berg oder zu Tal fährt. Auch hier werden die Fließgeschwindigkeiten in Potenzialwerte zwischen 1 und 100 linear umgerechnet. Der Wert 0 wird an Fließgeschwindigkeiten vergeben, die so groß sind, dass ein Schiff diesen Bereich des Profils nicht befahren kann. Fährt das Schiff zu Berg, so wird es immer die Strömungsbereiche meiden, in denen es gegen hohe Fließgeschwindigkeiten fahren muss. Aus diesem Grund erhalten die maximalen Fließgeschwindigkeiten für den Bergfahrer den Wert 1 und die minimalen Fließgeschwindigkeiten den Wert 100. Für den Talfahrer erfolgt die Bewertung genau umgekehrt. Maximale Fließgeschwindigkeiten bekommen den Wert 100 zugewiesen und die minimalen Fließgeschwindigkeiten den Wert 1.

Allgemein gilt: Ein Potenzial ist die Bewertung des Befahrbarkeitszustands eines Profilstreifens hinsichtlich eines Parameters auf einer Skala von 0 bis 100. Dazu werden zunächst die minimale und die maximale Größe des Parameters auf dem gesamten Profilschnitt ermittelt. Sofern ein großer Parameterwert als optimal angesehen wird, entspricht das Maximum einem Potenzial von 100. Andernfalls wird dem größten Parameterwert das kleinste Potenzial 1 zugeordnet. Nur dann, wenn ein Profilbereich bei Überschreitung eines Parametergrenzwertes als nicht befahrbar gelten soll, wird das Potenzialminimum 0 verwendet.

Nach diesen Kriterien lassen sich weitere Potenziale erstellen. Das ist z. B. das Vorhandensein einer Fahrrinne und der Zwang, innerhalb der Fahrrinne fahren zu müssen.

Für eine Modellierung des Flusses Rhein wurden folgende Potenziale verwendet:

- Wassertiefenverteilung
- Strömungsverteilung

- Vorhandensein und Nutzungsvorgabe einer Fahrrinne
- Verkehrsmodus (z. B. Vorgabe eines Rechtsverkehrs)
- Brückendurchfahrtsregeln
- Vorhandensein von Fahrinnenteilungen mit entsprechenden verkehrlichen Vorgaben
- Vorgabe zur Nutzung der blauen Tafel (Begegnung Stb/Stb)
- Sonderregeln, die z. B. nur bei Hochwasser am Rhein gelten

Alle genannten Parameter werden in Potenziale überführt und müssen über das Querprofil verteilt als Streifeninformation vorliegen. Die Normierung der Parameterwerte der einzelnen Streifen auf einer Skala von 0 bis 100 ermöglicht eine Bewertung der Befahrbarkeit der Profilabschnitte hinsichtlich dieses Parameters. Gleichzeitig gestattet sie den Vergleich und die Überlagerung der Potenzialverläufe verschiedener Parameter, so dass eine Gesamtbewertung der Befahrbarkeit jedes Querprofils möglich sind. Die Potenzialregeln werden entlang des zu untersuchenden Flusses für jedes Querprofil aufgestellt. Ein Beispiel für den Rhein zwischen Rh Km 569 und Rh km 575 ist in Abbildung 5 dargestellt.

Für eine Gesamtbewertung wird eine Gewichtung der einzelnen Potenziale eingeführt. Mit dieser Gewichtung wird es möglich, die Bedeutung einzelner Potenziale hervorzuheben oder abzumindern. So ist z. B. die Wassertiefe für ein Containerschiff, welches in der Regel mit geringem Tiefgang fährt, weniger von Bedeutung als für ein Schiff, welches mit seinem Tiefgang die maximalen Möglichkeiten des Gewässers ausnutzt. Die Summe der einzelnen Potenziale unter Berücksichtigung der Gewichtung jedes Gewässerparameters ergibt dann für jeden Profilbereich die zur Bewertung verwendete Potenzialsomme.

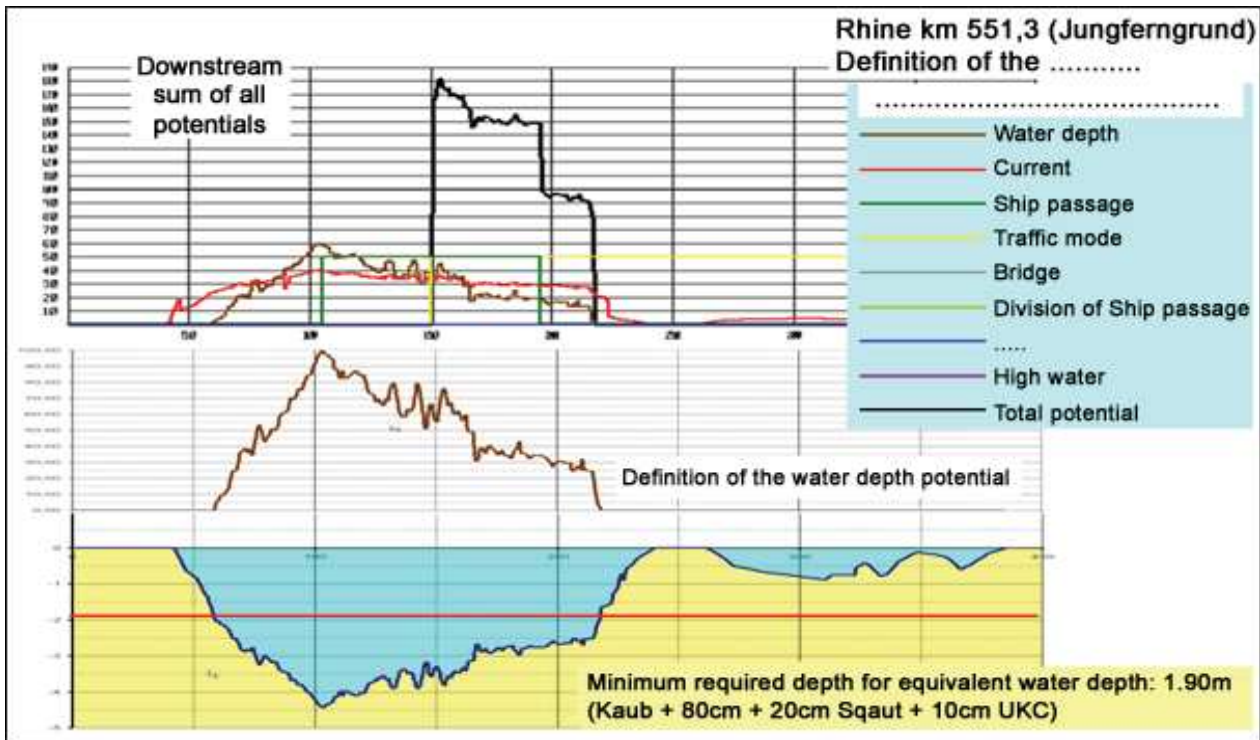


Abbildung 6: Zusammenfassung aller Potenziale am Beispiel Rhein km 551,3

Am Beispiel des eingangs aufgezeigten Querprofils bei Rh km 551,3 kann man die Entstehung eines Befahrbarkeitspotenzials sehen (Abbildung 6). Ausgangspotenzial war die Bewertung der Wassertiefe (in der unteren Bildhälfte braun dargestellt). Weitere Potenziale sind die Nutzung der Fahrrinne (grün), die Strömungsverteilung als Ziel für den Talfahrer (rot) und der Verkehrsmodus für die vorgeschriebene Nutzung der rechten Fahrrinnenhälfte.

Sind die Potenziale für die Querprofile des zu untersuchenden Fließgewässers aufgestellt, erfolgt eine Abschätzung der zu erwartenden Fahrspurbreite des Schiffes. In diese Abschätzung gehen die Schiffsabmessungen, der Kurvenradius des Gewässers und die fahrdynamischen Eigenschaften des Schiffes ein. Mit diesen Fahrspurbreiten werden für jedes Profil die Durchfahrtsbreiten mit dem höchsten Befahrbarkeitspotenzial ermittelt. Im Ergebnis entsteht eine Folge von Durchfahrtstoren, auf deren Grundlage eine Leitlinie für einen Schiffstyp konstruiert werden kann. Diese Leitlinie ist für einen bestimmten Abfluss und ein bestimmtes Schiff gültig.

Entwicklung von Leitlinien

Der Profilbereich mit dem höchsten Befahrbarkeitspotenzial gilt als optimal befahrbar und wird nachfolgend als "Passagetor" bzw. "Tor" bezeichnet, das von der Leitlinie durchlaufen werden sollte. Sofern es auf einem oder mehreren Profilen Bereiche mit ähnlich hoher Potenzialsomme gibt (Toleranzbereich für gleichwertige Potenziale ist definierbar), entstehen auf diesen Profilschnitten mehrere gleichwertige Tore und damit eine Vielzahl möglicher Leitlinienverläufe, aus denen jene Torfolge mit dem kürzesten Weg ermittelt wird. Der Durchstoßpunkt der Kursachse durch das letztendlich pro Profilschnitt ausgewählte Tor wird so

gelegt, dass das Schiff beim Durchfahren aller Tore einen möglichst kurzen Weg mit geringen Richtungswechseln zurücklegt (Abbildung 7).

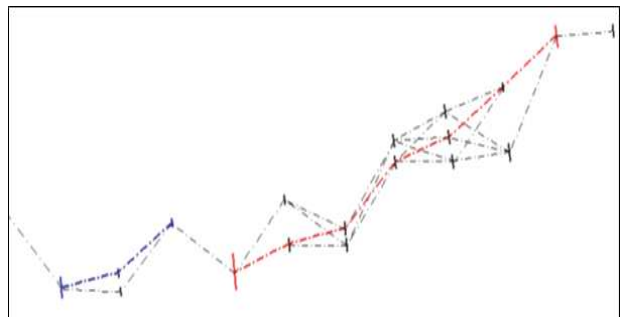


Abbildung 7: Auswahl geeigneter Passagetore anhand der kürzesten Route

In einem letzten, komplexen Berechnungsalgorithmus wird versucht, die Durchstoßpunkte aller Tore so durch eine Folge von Geraden und Kreisbögen zu verbinden, dass eine Modell-Leitlinie mit tangentialen Übergängen zwischen den Geraden und Kreisbögen entsteht, die möglichst alle Tore durchläuft.

Für diese Berechnungen wird ein Mindestradius von einer Schiffslänge vorgegeben. Um bei den Elementen der Leitlinie eine Bogenlänge größer als 0 zu garantieren, resultiert ein maximaler Radius. Da sich die Größen der Bogenradien gemäß vorgegebenem Mindestradius und des errechneten maximalen Radius nur in diesem vorgegebenen Bereich bewegen können, ist es nicht immer möglich, alle Tore unter Einhaltung aller Bedingungen zu passieren. Ist die Einbeziehung eines Passagetores in die Leitlinie nicht möglich, kann es zumindest in seiner berechneten Größe nicht beachtet werden. Um die Fahrrinne im Profilschnitt trotzdem zu berücksichtigen, wird es deshalb auf die

volle Fahrinnen- bzw. Fahrwasserbreite erweitert. Als Folge müssen die Durchstoßpunkte der Leitlinie durch diese und seine Nachbarore angepasst werden, was wiederum eine Neuberechnung der Bogenradien durch diese und weitere benachbarte Tore erfordert. Auch dieser Vorgang erfordert eine Neuberechnung von Durchstoßpunkten und Bogenradien. Die Berechnung der Leitlinie läuft deshalb in einem iterativen Prozess ab, in dem mehrere Teilberechnungen erfolgen. Erfordert das Ergebnis einer Teilberechnung die Änderung der Anzahl oder der Position eines Durchstoßpunktes, wird der Gesamtprozess erneut durchlaufen. Das geschieht so oft, bis Anzahl und Position der Punkte konstant bleiben und eine Verbindung der Punktfolge durch Bögen und gemeinsamen Tangenten zur Leitlinie möglich ist.

Folgende Berechnungsschritte werden in dieser Iteration ausgeführt:

1. Berechnung der Folge von Durchstoßpunkten durch die Tore
2. Ggf. Eliminierung kollinearere Tore (Tore, deren Durchstoßpunkte mit minimaler Abweichung auf der Verbindung Vorgänger-Nachfolgekpunkt liegen)
3. Ermittlung der Tore, bei denen ein Fahrtrichtungswechsel stattfindet (Vorzeichenänderung der Bogenradien)
4. Berechnung der Bogenradien und ggf. Verbreiterung einzelner Tore
5. Testberechnung der Kursachse (lassen sich alle Bögen durch Tangenten verbinden) und ggf. Eliminierung von Toren

Nach diesen Berechnungen werden solche aufeinander folgende Durchstoßpunkte gesucht, die sich auf einem einzigen Kursachsen-Kreisbogen darstellen lassen. Dazu wird für jeden Kreisbogen durch ein Tor geprüft, ob und wie viele unmittelbar nachfolgende Tore (mit gleichem Bogenradiusvorzeichen) er so schneidet, dass sich der Schnittpunkt jeweils mindestens eine halbe Schiffsbreite von der Torbegrenzung entfernt befindet. Der Bereich der Kursachse durch diese aufeinander folgenden Tore wird dann von einem einzigen Kreisbogen gebildet. Im Anschluss muss die an diesen Kreisbogen anschließende Tangente zum nachfolgenden Bogen erneut berechnet werden.

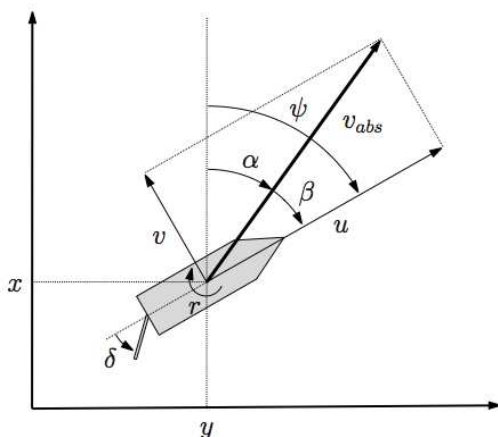


Abbildung 8: Koordinatensystem für mathematische Modelle.

Automatische Bahnführung

Die automatisch generierte Leitlinie dient als Referenzbahn für ein automatisches Bahnführungssystem. Dieses Regelungssystem ist in seiner Standardvariante in der Lage, den Querabstand des Schwerpunkts des Schiffes zur Leitlinie unter Zuhilfenahme des Ruderwinkels als einziger Stellgröße zu minimieren. Dieses automatische Bahnführungssystem kann also für Untersuchungen unter normalen navigatorischen Bedingungen eingesetzt werden, bei denen nur der Ruderwinkel als einziger Eingang verwendet wird. Umgebungseinflüsse wie Wind und Strömung werden als externe Störungsgrößen behandelt. Bei Kenntnis dieser Größen ist es möglich, die Regelgüte erheblich zu verbessern, indem diese explizit berücksichtigt werden.

Dieser Single-Input-Single-Output-Regler kann für den Fall mehrerer Ein- und Ausgänge erweitert werden. Damit werden Spezialmanöver wie Schleuseneinfahrt oder Navigation in stark begrenzten Fahrwassern ermöglicht. Zusätzlich zum Querabstand zur Leitlinie wird für diese Fälle der Driftwinkel des Schiffes minimiert. Das bedeutet, dass die Längsachse des Schiffes tangential zur Leitlinie gehalten wird. Um das zu erreichen, wird das Bugstrahlruder als weiterer Eingang verwendet.

Beide Regler bestehen aus einem Vorsteuerungsanteil (feed-forward) und einer Rückführung (feed-back), vgl. Abbildung 9. Der Vorsteuerungsanteil berechnet sich aus einem inversen mathematischen Modell der Schiffsdynamik. Dieses mathematische Modell wird ebenfalls verwendet für die Berechnung der Rückführung in Form eines Riccati-Reglers. Im Folgenden werden zunächst die verwendeten mathematische Modelle des dynamischen Verhaltens des Schiffes eingeführt. In einem zweiten Schritt werden die Vorsteuerungsanteile aus Größen der Referenzbahn mit Hilfe dieser Modelle hergeleitet. Die Berechnung der Rückführung schließt das Kapitel zur automatischen Bahnführung ab.

x	... Position in northern direction in m
y	... Position in eastern direction in m
u	... Longitudinal velocity in m/s
v	... Lateral velocity in m/s
v_{abs}	... Absolute velocity in m/s
δ	... Rudder angle in rad
r	... Rate of turn in rad/s
ψ	... Heading in rad
α	... Course over ground in rad
β	... Drift angle in rad

Mathematische Modelle

Für den Standardfall wird ein Modell mit zwei Freiheitsgraden in der Ebene verwendet, vgl. Figure 8. Die Rotationsdynamik um die Hochachse des Schiffes wird als Verzögerungsglied erster Ordnung der Drehrate r mit der Zeitkonstante T_r und der Verstärkung K_r , sowie dem Ruderwinkel δ als einzigem Eingang modelliert, vgl. (Nomoto, Taguchi, Honda, & Hirano, 1957).

$$\begin{aligned}\dot{r} &= -\frac{1}{T_r} r + \frac{K_r}{T_r} \delta, \\ \dot{\psi} &= r, \\ \dot{\beta} &= -\frac{1}{L'_\beta} v_{abs} \beta + K_\beta r, \\ \dot{x} &= v_{abs} \cos(\psi - \beta), \\ \dot{y} &= v_{abs} \sin(\psi - \beta).\end{aligned}$$

Der Driftwinkel β , welcher sich ergibt als der Winkel zwischen der Schiffslängsachse und seines Kurses, wird zur Modellierung der Querdynamik des Schiffes eingesetzt. Die Längsdynamik des Schiffes wird als stationär betrachtet. Diese Annahme ist gültig, weil sich die Längsgeschwindigkeit des Schiffes u nur langsam verändert im Vergleich zur Drehrate des Schiffes r sowie seiner Quergeschwindigkeit v . Die Differentialgleichungen für die anderen Zustände ψ , x und y ergeben sich direkt aus der Kinematik. Die Parameter des Modells T_r , K_r , L'_β und K_β werden mit Hilfe von Methoden der Parameteridentifikation aus Messfahrten mit Großschiffen berechnet.

Vorsteuerung

Unter der Annahme eines perfekten Modells des Schiffes hält der Ruderwinkel der Vorsteuerung das Schiff auf der Leitlinie, sofern keine Störungen vorhanden sind. Er kann durch Modellinversion berechnet werden. Der Winkel der Vorsteuerung δ_{ff} ist eine Funktion von Eigenschaften aus der Leitlinie. Wird die Gleichung der Drehgeschwindigkeit invertiert, so ergibt sich

$$\delta_{ff} = \frac{1}{K_r} r_s + \frac{T_r}{K_r} \dot{r}_s.$$

Die Drehgeschwindigkeit r und ihre Zeitableitung auf der rechten Seite der Gleichung werden mit einem Index s versehen, um zu verdeutlichen, dass es sich hierbei um Sollgrößen handelt, welche aus der Leitlinie berechnet werden können. Aus der dritten Gleichung (β -Dynamik) kann die folgende Gleichung für die Soll-drehgeschwindigkeit r_s unter Zuhilfenahme der Zeitableitung der kinematischen Gleichung $\psi_s = \alpha_s + \beta_s$ hergeleitet werden:

$$r_s = -\frac{1}{L'_\beta} \frac{v_{abs}}{1 - K_\beta} \beta_s + \frac{1}{1 - K_\beta} \dot{\alpha}_s$$

Die Zeitableitung dieser Gleichung zusammen mit der β -Gleichung von oben ergibt

$$\dot{r}_s = \left(\frac{1}{L'_\beta} \frac{v_{abs}}{1 - K_\beta} \right)^2 \beta_s - \frac{K_\beta}{L'_\beta} \frac{v_{abs}}{(1 - K_\beta)^2} \dot{\alpha}_s + \frac{1}{1 - K_\beta} \ddot{\alpha}_s$$

$\dot{\alpha}_s$ und $\ddot{\alpha}_s$ können direkt aus der Leitlinie berechnet werden. α bezeichnet hierbei den Sollkurs des Schiffes, welcher identisch ist zur Richtung der Tangente an die Leitlinie. Seine erste und zweite Zeitableitung ergeben sich aus der Krümmung der Leitlinie κ wie folgt:

$$\begin{aligned}\dot{\alpha}_s(t) &= v_{abs} \kappa_s(s) \\ \ddot{\alpha}_s(t) &= v_{abs}^2 \kappa'_s(s)\end{aligned}$$

Der verbleibende Sollwert des Driftwinkels β_s wird aus der dritten Gleichung wiederum zusammen mit der kinematischen Gleichung für die Winkel $\psi_s = \alpha_s + \beta_s$ hergeleitet:

$$\dot{\beta}_s = -\frac{1}{L'_\beta} \frac{v_{abs}}{1 - K_\beta} \beta_s + \frac{K_\beta}{1 - K_\beta} \dot{\alpha}_s$$

Hierbei handelt es sich um eine stabile Differentialgleichung für den Driftwinkel β mit der Zeitableitung der Richtung der Leitlinie als Eingang. Diese kann online mit Hilfe der Krümmung der Leitlinie integriert werden. Die drei Gleichungen für r_s , \dot{r}_s und $\dot{\beta}_s$ werden in die Gleichung für δ_{ff} eingesetzt. Der Vorsteuerungsanteil des Ruderwinkels kann also damit ausschließlich aus Parametern der Leitlinie berechnet werden.

Rückführung

Der Vorsteuerungsanteil des Ruderwinkels ist in der Lage, das Schiff auf der Referenzbahn zu halten, solange keine Störungen vorhanden sind und unter der Annahme eines perfekten dynamischen Modells. Der Schiffsführungssimulator verwendet jedoch ein wesentlich detaillierteres Modell mit sechs Freiheitsgraden. Um damit gültige Vorhersagen zu generieren, werden Wind und Strömung ebenfalls simuliert. Das bedeutet, dass eine Rückführung nötig ist, um Abweichungen zu kompensieren, die durch Modellungenauigkeiten und vernachlässigten umweltbedingten Störgrößen hervorgerufen werden. In dieser Arbeit wird ein unbeschränkter Riccati-Regler verwendet. Die resultierende Rückführung minimiert das Kostenfunktional

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T (\tilde{\mathbf{x}}^T Q \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{u}^T R \mathbf{u}) dt$$

mit $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_s$. Der Zustandsvektor \mathbf{x} besteht aus dem Nordwinkel (Heading), dem Kurs, der Drehgeschwindigkeit um die Hochachse, dem Abstand zur Leitlinie sowie dem integrierten Abstand zur Leitlinie. Der Eingang \mathbf{u} enthält ausschließlich den Ruderwinkel δ . In Abbildung 9 ist die gesamte Reglerstruktur dargestellt.

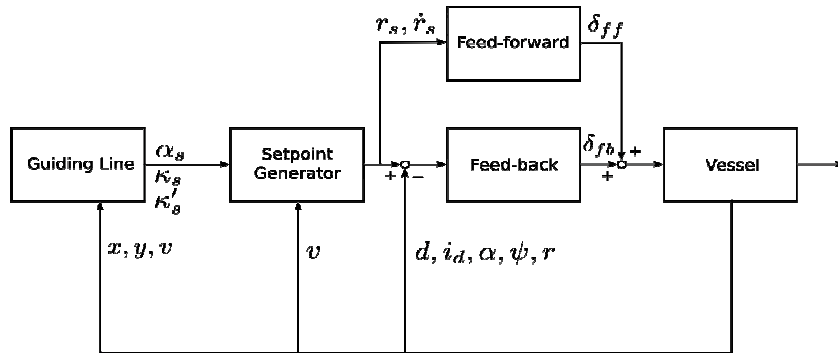


Abbildung 9: Reglerstruktur der automatischen Bahnführung: Vorsteuerung und Rückführung.

Manöverregelung

Der oben eingeführte Regler zur automatischen Führung von Binnenschiffen entlang Leitlinien verwendet nur den Ruderwinkel als Eingang und ist daher auch nur in der Lage, den Schwerpunkt des Schiffes auf der Leitlinie zu halten. Für spezielle Manöver wie Schleuseneinfahrten oder Fahrten in stark begrenzten Fahrwassern dient das Bugstrahlruder als weitere Stellgröße. Im Folgenden werden hierfür das Modell und der Sollwertgenerator vorgestellt.

Ergebnisse

Abbildung 10 zeigt ein Bildschirmaufnahme des elektronischen Kartensystems des Simulators mit der MS Vigilia, einem 135 m Motorgüterschiff, auf dem Rhein. Das Simulationsmodell besitzt sechs Freiheitsgrade. Seine Parameter wurden mit Hilfe von Parameteridentifikation gewonnen, bei der die Parameter solange verändert werden, bis das simulierte Schiffsverhalten mit dem Verhalten aus zuvor aufgenommenen Messdaten übereinstimmt. Der Simulator berücksichtigt außerdem das Vektorfeld der Flussströmung sowie Kräfte und Momente, die von Wind verursacht werden. Die Simulation erfolgt in Echtzeit. Die Hardware-Schnittstelle zwischen Simulator und Regelungssystem entspricht derjenigen auf realen Schiffen. Wie bereits erwähnt ist das Regelungssystem mit dem Ruderwinkel als einzigem Eingang in der Lage, den Schwerpunkt des Schiffes auf der vorgegebenen Leitlinie zu halten. Der resultierende Driftwinkel hängt von der Geschwindigkeit des Schiffes sowie von der Krümmung der Leitlinie ab. Im Gegensatz zu seither verwendeten Methoden zur Bestimmung der benötigten Fahrspurbreite sind bei der hier vorgestellten Simulation in Kombination mit einem Regelungssystem zur automatischen Bahnführung keine Annahmen über die Stationarität von dynamischen Modellzuständen nötig.

Typische Werte für den sich ergebenden Abstand zur Leitlinie finden sich in Abbildung 11. Die Regelgüte hängt dabei von der Größe der Störungen sowie der Modellunsicherheiten ab. Die Standardabweichung des Abstands zur Referenzbahn beträgt unter normalen Bedingungen weniger als 2 m.



Abbildung 10: Automatische Bahnführung mit dem nötigen Driftwinkel β

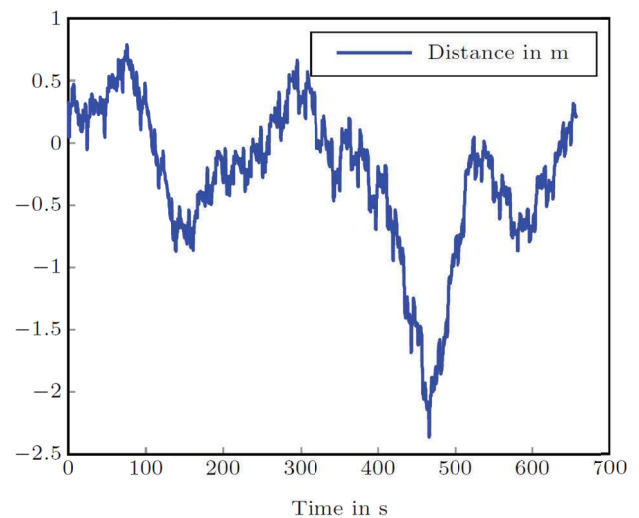


Abbildung 11: Typische Abweichungen von der Leitlinie für das automatische Bahnführungssystem bei rigorosem Simulationsmodell mit Störungen

Mathematisches Modell

Das Modell für die Manöverregelung basiert auf einem 3-Freiheitsgrade-Modell aus (Fossen, 2011). Im Gegensatz zu obigem Modell wird anstatt des Driftwinkels β die Quergeschwindigkeit v zur Modellierung der Querdynamik verwendet. Das vollständige u, v -Modell lautet:

$$\begin{aligned} \dot{u} &= \frac{1}{m - X_{\dot{u}}} [mvr - Y_{\dot{v}}v_r r + X'] \\ \dot{v} &= \frac{1}{m - Y_{\dot{v}}} [-mur + X_{\dot{u}}u_r r + Y'] \\ \dot{r} &= \frac{1}{I_z - N_{\dot{r}}} [(Y_{\dot{v}} - X_{\dot{u}})u_r v_r + N'] \\ \dot{x} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y} &= u \sin \psi + v \cos \psi \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned}$$

Die hydrodynamischen Kräfte und Momente werden als lineare und quadratische Dämpfungsterme wie in (Blanke, 1981) modelliert:

$$\begin{aligned} X' &= X_u u_r + X_{|u|u} |u_r| u_r + X'' \\ Y' &= Y_v v_r + Y_{|v|v} |v_r| v_r + Y_{|v|r} |v_r| r + Y'' \\ N' &= N_r r + N_{|v|v} |v_r| v_r + N_{|v|r} |v_r| r + N'' \end{aligned}$$

m ... Mass in kg
 I_z ... Mass moment of inertia in kgm²
 $X_{\dot{u}}$... Added mass term in x in kg
 $Y_{\dot{v}}$... Added mass term in y in kg
 $N_{\dot{r}}$... Added mass term about vertical axis in kgm²
 X' ... Hydrodynamic forces in x in N
 Y' ... Hydrodynamic forces in y in N
 N' ... Hydrodynamic moments about vertical axis in Nm

Die neu eingeführten Parameter sind alle konstant und werden typischerweise wiederum aus Messdaten von Testfahrten mit Hilfe von Parameteridentifikation erzeugt. Die Terme der sogenannten Added Mass können auch aus potentialtheoretischen Berechnungen auf Basis von Geometriedaten des Schiffes gewonnen werden, vgl. hierzu (Newman, 1977). Die Kräfte und Momente aufgrund der Stellgrößen werden X'' , Y'' and N'' bezeichnet. Der Index r steht für Werte relativ zum Wasser. Der Einfachheit halber wird hier auf Strömung verzichtet, so dass der Index weggelassen werden kann.

Vorsteuerung

Um diejenigen Stellgrößen zu berechnen, die bei idealem Modell und unter Vernachlässigung der Störungen das Schiff auf seiner Sollbahn mit verschwindendem Driftwinkel halten, wird wiederum das mathematische Modell invertiert. Die sich ergebenden Gleichungen zeigen die Kräfte und Momente der Aktuatoren als Funktionen von Leitlinienparametern wie Richtung, Krümmung sowie Ableitungen davon. Werden die Gleichungen nach diesen Kräfte und Momente aufgelöst, erhält man mit dem Index s zur Bezeichnung von Sollgrößen:

$$\begin{aligned} X_s'' &= (m - X_{\dot{u}}) \dot{u}_s - m v_s r_s + Y_{\dot{v}} v_s r_s - X_u u_s - X_{|u|u} |u_s| u_s + \\ Y_s'' &= (m - Y_{\dot{v}}) \dot{v}_s + m u_s r_s - X_{\dot{u}} u_s r_s - Y_v v_s - Y_{|v|v} |v_s| v_s - Y_{|v|r} |v_s| r_s \\ N_s'' &= (I_z - N_{\dot{r}}) \dot{r}_s - (Y_{\dot{v}} - X_{\dot{u}}) u_s v_s - N_r r_s - N_{|v|v} |v_s| v_s - N_{|v|r} |v_s| r_s \end{aligned}$$

Die nötigen Kräfte und Momente können berechnet werden, wenn alle Werte auf der rechten Seite der Gleichungen bekannt sind. Das Ziel ist die Ansteuerung von Ruder und Bugstrahl, so dass der Schwerpunkt des Schiffes auf der Leitlinie verbleibt und der Driftwinkel verschwindet. Die Längsdynamik wird dominiert von der Motordrehzahl, welche in diesem Fall nicht als Stellgröße verwendet wird. Die Voraugeschwindigkeit wird nicht geregelt. Die erste Gleichung kann deshalb vernachlässigt werden. Die Voraugeschwindigkeit u wird als zeitvarianter Parameter betrachtet. Es verbleiben der Sollwert der Quergeschwindigkeit v_s und der Sollwert der Drehgeschwindigkeit r_s sowie deren Zeitableitungen als Unbekannte. Der Sollwert der Quergeschwindigkeit sowie die zugehörige Ableitung sind beide Null wegen des verschwindenden Driftwinkelsollwerts. Der Sollwert der Drehgeschwindigkeit sowie

dessen Zeitableitung können ebenso wie oben aus der Zeitableitung der kinematischen Gleichung

$\psi_s = \alpha_s + \beta_s \rightarrow r_s = \dot{\alpha}_s + \dot{\beta}_s$ berechnet werden:

$$v_s = 0$$

$$\dot{v}_s = 0$$

$$r_s = \dot{\alpha}_s + \dot{\beta}_s = u \kappa + 0$$

$$\dot{r}_s = \ddot{\alpha}_s + \ddot{\beta}_s = u^2 \kappa' + 0$$

Wie oben für den Fall der automatischen Bahnführung gezeigt, können auch hier die Kräfte und Momente, die nötig sind, um bei verschwindendem Driftwinkel auf der Leitlinie zu bleiben, mit Hilfe von Größen aus der Leitlinie ausgedrückt werden. Aus den Sollkräften und -momenten können die Sollwerte für den Ruderwinkel und die Bugstrahldrehzahl über entsprechende Aktuatormodelle berechnet werden.

Rückführung

Ein Riccati-Regler mit den Zuständen $x = (v r d \psi)^T$ kompensiert Modellunsicherheiten und Störungen der Umgebung. d bezeichnet den Abstand zur Leitlinie. Die zugehörige Differentialgleichung für den Abstand d kann aus kinematischen Zusammenhängen mit der Richtung der Leitlinie α_{gl} gewonnen werden:

$$\dot{d} = u \sin(\psi - \alpha_{gl}) + v \cos(\psi - \alpha_{gl})$$

Zusammen mit den Differentialgleichungen für v, r und ψ ergibt sich ein nichtlineares dynamisches Modell der Form

$$\dot{x} = f(x, u)$$

Hinweis: u steht für den Eingangsvektor mit den Größen Ruderwinkel und Bugstrahldrehzahl. Um ein solches nichtlineares Modell in einem Riccati-Regler verwenden zu können, muss es um die Sollwerte x_s und u_s linearisiert werden:

$$\dot{x} = f(x_s, u_s) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_s, u=u_s} (x - x_s) + \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{x=x_s, u=u_s} (u - u_s)$$

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u$$

mit

$$\Delta x = x - x_s$$

$$\Delta \dot{x} = \dot{x} - f(x_s, u_s) = \dot{x} - \dot{x}_s$$

$$\Delta u = u - u_s$$

und

$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_s, u=u_s} \quad B = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{x=x_s, u=u_s}$$

Das lineare Modell mit den Matrizen A und B wird schließlich im Riccati-Regler verwendet, um das obige Kostenfunktional mit den beiden Eingängen Ruderwinkel und Bugstrahlrehzahl zu minimieren. Die Gesamtstellgrößen ergeben sich jeweils aus der Summe der Vorsteuerungs- und Rückführungsanteile.

Ergebnisse

Der Manöverregler verwendet zwei Stellgrößen, den Ruderwinkel sowie das Bugstrahlruder. Mit einer solchen Konfiguration ist es möglich Querbewegungen bei einem konstanten Nordwinkel zu realisieren. Bei der klassischen automatischen Bahnführung mit nur einer Stellgröße muss für ein solches Manöver eine S-Kurve gefahren werden. Ein solches Szenario wird in Abbildung 12 dargestellt. Die Anfangsposition des Schiffes liegt zwei Meter rechts von der Leitlinie. Um diesen Anfangsversatz zu eliminieren, wird das Ruder in Richtung Steuerbord bewegt. Dies resultiert in einer Kraft am Ruder, die in Backbordrichtung zeigt. Zur gleichen Zeit wird das Bugstrahlruder vom Regler in einer Weise betätigt, dass auch hier eine Kraft in Backbordrichtung entsteht. Das Bugstrahlruder wirkt auf den Bug des Schiffes, während das Ruder auf das Heck des Schiffes wirkt. Beide Kräfte zeigen in Backbordrichtung. Ihre Größen werden vom Regler so eingestellt, dass das resultierende Moment um die Hochachse verschwindet. Dadurch wird gewährleistet, dass sich der Nordwinkel wie gefordert nicht ändert. Zum Zeitpunkt 50 Sekunden werden die Richtungen beider Kräfte umgekehrt. Diese Bremsphase wird benötigt, um ein Überschießen zu verhindern.

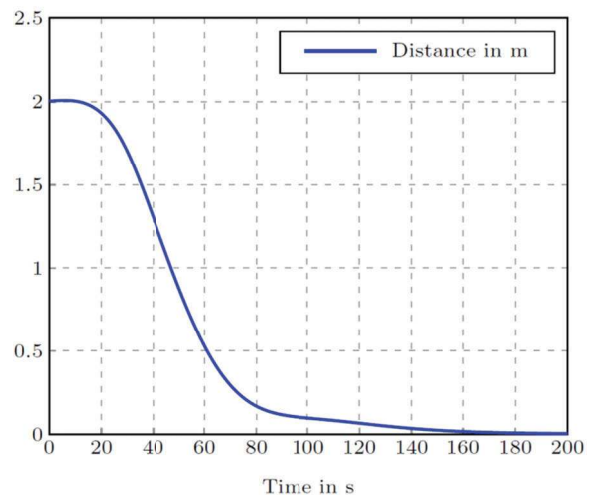
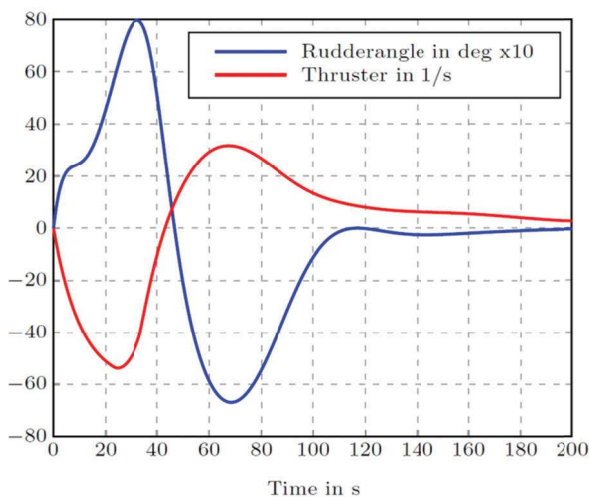


Abbildung 12: Ruderwinkel und Bugstrahlruder sowie Abstand zur Leitlinie während eines Manövers zur Kompensation eines Querversatzes

Literatur

- Blanke, M. (1981). *Ship Propulsion Losses Related to Automatic Steering and Prime Mover Control*. Technical University of Denmark.
- Fossen, T. (2011). *Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Newman, J. (1977). *Marine Hydrodynamics*. Cambridge, Mass.: The MIT Press.
- Nomoto, K., Taguchi, T., Honda, K., & Hirano, S. (1957). On the Steering Qualities of Ships. *International Shipbuilding Progress* 4.

Verfasser

Dipl.-Ing. Alexander Lutz
Universität Stuttgart
Institut für Systemdynamik
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Tel.: 0711/685-66306
E-Mail: lutz@isys.uni-stuttgart.de

Dipl.-Ing. Thorsten Dettmann
Bundesanstalt für Wasserbau
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe
Tel.: 0721/9726-2750
E-Mail: thorsten.dettmann@baw.de

Dipl.-Ing. Rolf Zentgraf
Bundesanstalt für Wasserbau
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe
Tel.: 0721/9726-4640
E-Mail: rolf.zentgraf@baw.de

Einfluss des Schraubenstrahls aus Schifffahrt auf Sedimentresuspension und Sohlerosion

Dr. Oliver Stoschek
DHI-WASY GmbH, Syke

Dr. Elimar Precht
DHI-WASY GmbH, Syke

Dr. Ole Larsen
DHI Water & Environment (S) Pte. Ltd., Singapur

Mamta Jain (Ph. D.)
DHI Water & Environment (S) Pte. Ltd., Singapur

Lars Yde (ChEng)
DHI Water & Environment (S) Pte. Ltd., Singapur

Dipl.-Ing. Nino Ohle
HPA Hamburg Port Authority, Hamburg

Dipl.-Ing. Thomas Strotmann
HPA Hamburg Port Authority, Hamburg

Zusammenfassung und Ausblick

In der hier vorgestellten Studie wurden Naturmessungen, Labormessungen und unterschiedliche Methoden zur Modellierung Strömungen und Sedimenttransport verwendet, um den schiffsinduzierten Sedimenttransport im Hafen in Singapur und Hamburg sowie auch in der Elbe zu untersuchen. Hier konnte zunächst nur ein Überblick über die unterschiedlichen Ansätze und Ergebnisse gegeben werden. Zusammenfassend zeigt sich der größte Einfluss bei der Manöverfahrt in den jeweiligen Häfen. Aber auch die Revierfahrt kann eine der Ursachen für die Verschlickung von Seitenbereichen darstellen. Im Umfeld von Bereichen mit geringer Kielfreiheit kann es im Laufe eines Jahres zu merklichen schiffsinduzierten Sedimentumlagerungen kommen.

1. Einleitung

Voraussetzung für ein ausgewogenes Sedimentmanagement in Flussgebieten und Ästuaren ist neben vielen anderen Einflussgrößen - auch die Kenntnis der durch den Schiffsverkehr erhöhten Sedimentfracht sowie deren Wechselwirkungen mit der Hydrogeomorphologie und Ökologie.

Schwebstoffe und Sedimente inklusive ihrer abiotischen und biotischen Komponenten sind in diverse Prozesse im benthischen und pelagischem Bereich eingebunden. So kommt es in Bereichen mit geringerer Fließgeschwindigkeit zu verstärkter Sedimentation von Schwebstoffen und Sauerstoffzehrungsprozessen, die wiederum Organismen des Ökosystems beeinträchtigen können. Sedimentgebundene Nähr- und Schadstoffe werden durch Resuspension ins Pelagial freigesetzt und können so die Wasserqualität und den Lebensraum von biologischen Lebensgemeinschaften beeinflussen.

Die durch den Schiffsverkehr in einer Wasserstraße hervorgerufenen Einwirkungen auf die Gewässersohle und Ufer resultieren entweder direkt aus dem Propellerstrahl oder aber indirekt aus den Verdrängungsströ-

mungen und den schiffserzeugten Wellen. Ausführliche Zusammenstellungen zu Letzterem finden sich u.a. in ULICZKA UND KONDZIELLA (2006).

Empirisch-analytische Ansätze sind u. a. für die Ermittlung der erosiven Wirkung der Schiffsantriebe entwickelt worden (z.B. LAM et al. 2011). Sie erfordern jedoch weitere Absicherung durch Naturmessungen und/oder physikalische beziehungsweise numerische Modellversuche.

In der hier vorgestellten Studie werden erste Ergebnisse von Untersuchungen dargestellt, die zum Ziel hatten, mit Hilfe einer Literaturstudie, Naturmessungen, der Auswertung empirischer Ansätze, physikalischen Modellversuchen sowie numerischer Modellierung schiffsschraubenstrahlinduzierten Sedimenttransport in Abhängigkeit seiner Einflussgrößen zu quantifizieren. Hierbei sind sowohl CFD Modelle (OpenFOAM (OPENFOAM 2013) sowie großskalige Modelle (MIKEbyDHI (DHI 2013)) zum Einsatz gekommen. Im Folgenden wird die Schiffsschraube durchgehend als Propeller bezeichnet.

Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden gefördert durch: Hamburg Port Authority (HPA), Maritime Port Authority (MPA) Singapur.

2. Empirische Beschreibungen des Propellerstrahls

Der Propellerstrahl eines Schiffes ist auf Grund der Vielzahl der Einflussgrößen und Prozesse (z. B. Kavitation, Turbulenz) ein sehr komplexes Phänomen (siehe auch Abbildung 1 im Labormaßstab). Eine empirische Betrachtung stellt daher immer einen vereinfachten Ansatz dar, gleichwohl können auf Basis der Axialmomenttheorie von ALBERTSON et al. (1950) wertvolle Abschätzungen der Wichtigkeit der Einflussgrößen gewonnen werden. Existierende empirische Beschreibungen wurden verwandt, um in einer Sensitivitätsanalyse die Bedeutung der Einflussgrößen auf die Geschwindigkeiten des Propellerstrahls in Sohlhöhe zu quantifizieren. Untersucht wurden: Kielfreiheit, Propellerdurchmesser, Propellerumdrehungen, Schiffsgeschwindigkeit sowie der Ruderwinkel.

Die Sensitivitätsanalyse zeigte, dass die Veränderung der Schiffsgeschwindigkeit den größten Einfluss auf die Sohlgeschwindigkeiten hat, wobei der Beschleunigungsfall (hohe Propellerumdrehungen bei niedriger Geschwindigkeit) den größten Einfluss darstellt. Ein Ruder hat ebenfalls sehr große Auswirkungen, vor allem bei negativen Winkeln (steuerbord) bei rechtsdrehenden Propellern (Abb. 2). Ein Teil des Propellerstrahls wird bei beschränktem Fahrwasser direkt auf die Sohle gerichtet. Eine größere Kielfreiheit mindert diese Effekte deutlich ab.

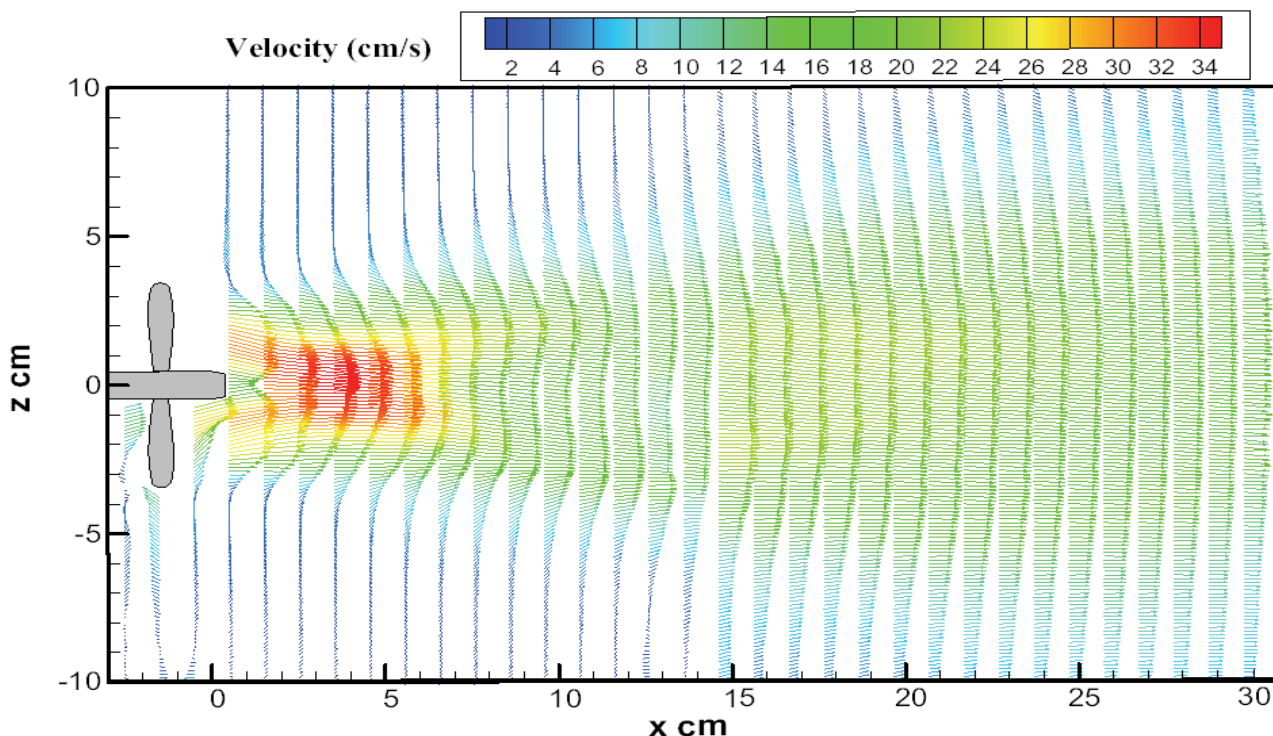


Abb. 1: Strömungsquerschnitt im Propellerstrahl gemessen im Labor mit Hilfe von Particle Image Velocimetry (PIV). Parameter: Propellerdurchmesser 7.5 cm, Nabdurchmesser 1.6 cm, Umdrehungen 500 min⁻¹. Versuch in den Laboren der Nanyang Technological University, Singapore.

3. CFD Modellierung

CFD-Simulationen wurden mit dem Programm OpenFOAM) durchgeführt. In den CFD Simulationen wurden zwei unterschiedliche Berechnungsansätze zur Beschreibung der Propeller und des von ihnen induzierten Strahles genutzt. Als Referenzszenario wurden Berechnungen mit dem Sliding Mesh Verfahren durchgeführt (s. auch Abbildung 2).

dem Sliding Mesh Model (GGI) ist der zu berechnende Bereich in zwei separate Gebiete unterteilt. In eines mit dem Rotornetz, welches dem Propeller folgt, und in eines mit einem Statornetz, welches den restlichen Modellbereich abbildet (Abb. 3). Als Referenzpropeller diente der gut beschriebene Wageningen B Propeller mit 5 Blättern.

Da direkte Messungen im Propellerstrahl nicht vorlagen, wurden zur Validierung Drehmoment und Schub verglichen.

Zur Berechnung der Szenarien zur Bedeutung der Einflussgrößen wurde das Multiple Reference Model genutzt, welches den besten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenaufwand darstellte. Der Multiple References Ansatz (MRF) ist eine stationäre Formulierung, bei der der Rotor und der Stator im Bezug zu einander fixiert wurden und andere Bereiche im stationären und rotierenden Bereich zur Strahlerzeugung verwendet werden (Reference Frames, Impuls-gleichung mit Coriolis- und Fliehkräften in Bezug zu einem sich selbst drehenden Bezugssystem). Die Abb. 4 zeigt den Vergleich mit dem validierten Sliding Mesh Modell.

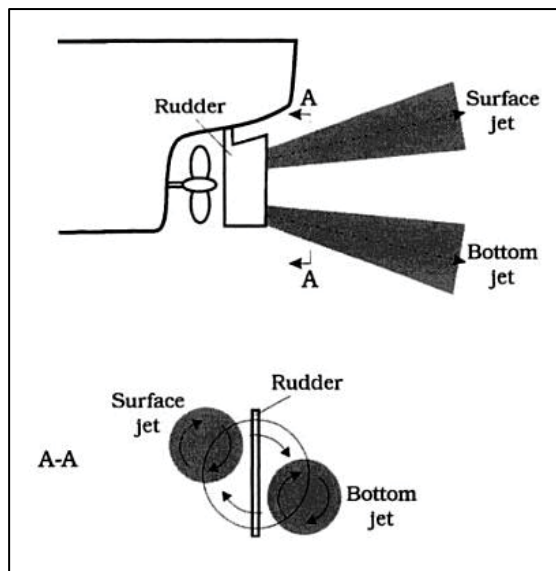


Abb. 2: Prinzipskizze der Aufteilung eines Propellerstrahls durch das Ruder (B. Mutlu, Sumer, J. Fredsoe, 2002)

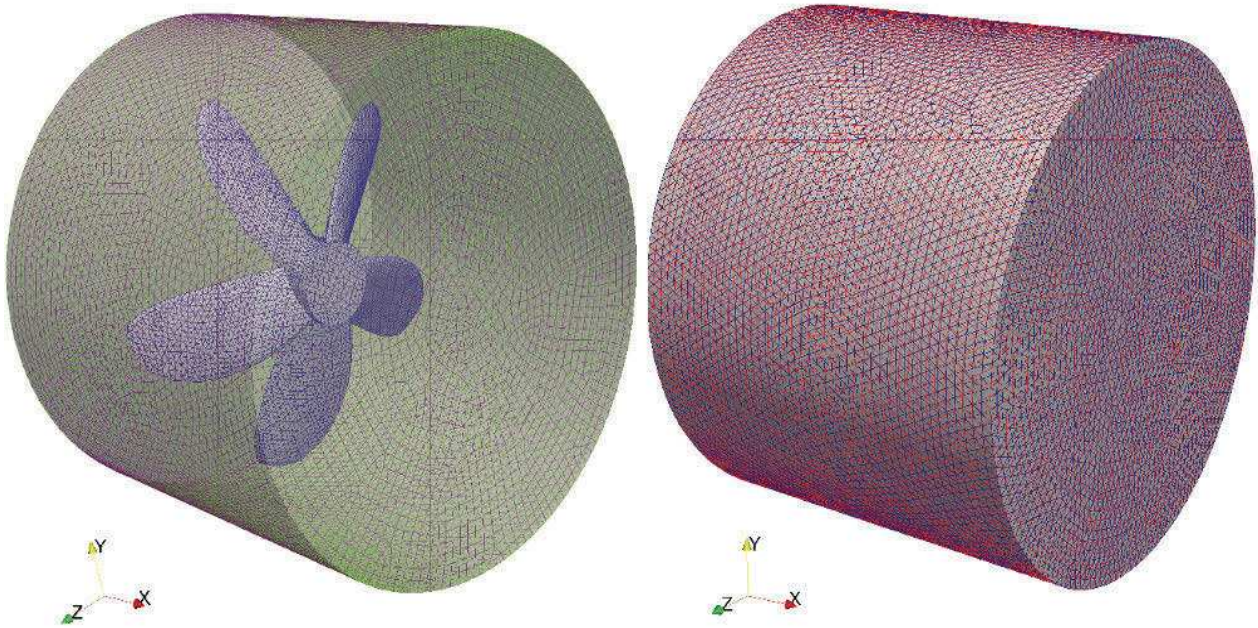


Abb. 3: Sliding Mesh Modell des Wageningen B Propellers. Durchmesser 8 m.

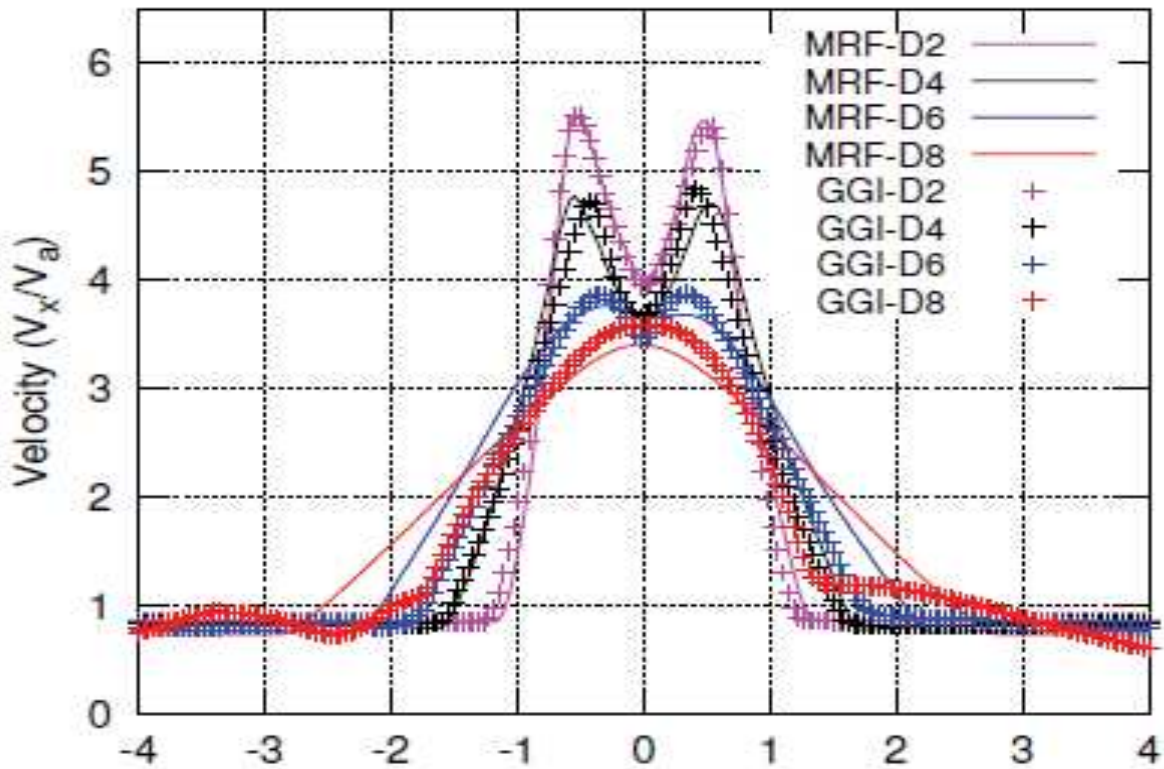


Abb. 4: Variation (longitudinale Geschwindigkeit geteilt durch die Propellergeschwindigkeit) versus der radialen Distanz des Propellerstrahls geteilt durch den Propellerdurchmesser) der Geschwindigkeit hinter einem Propeller auf der Basis eines sliding mesh Modells (GGI) und eines MRF Modells. Ergebnisse in einer Entfernung von 2, 4 und 6 Propellerdurchmessern hinter dem Propeller

Mit diesem Modell wurden die weiteren Simulationen unter Verwendung der Geometrie des Rumpfes und des Propellers der Susanne Maersk durchgeführt (Abb. 5). Die Geometrie wurde freundlicherweise von Maersk A/S zur Verfügung gestellt. Die Susanne Maersk ist ein Containerschiff mit 347 m Länge, 42 m Breite, und 13.7 m Tiefgang sowie einer Kapazität von 6.600 TEU. Ihr Propeller ist 6-blättrig und hat einen Durchmesser von 9 m. Damit stellt die Susanne Maersk einen weltweit gängigen Schiffstyp dar. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Untersuchungsmatrix. Alle Berechnungen wurden mit einer nicht erodierbaren Sohle mit einer Rauigkeit von 1mm durchgeführt.

Die CFD Modellierung bestätigt die Ergebnisse aus Laborversuchen und empirischen Ansätzen und zeigt dass die propellerstrahlinduzierte Resuspension mit größerem Propellerdurchmesser D_p und Umdrehungszahl sowie geringerer Kielfreiheit und Schiffsgeschwindigkeit zunimmt. Weiterhin hat sich auch hier gezeigt, dass der Ruderwinkel einen erheblichen Einfluss hat. Insbesondere bei dem rechtsdrehenden Propeller und bei Steuerbordmanövern wird die Sohle stärker belastet.

4. Naturmessungen

Messungen des propellerinduzierten Sedimenttransports achterauf von außergewöhnlich großen Fahrzeugen (AGF) sind auf Grund von Sicherheitsbestimmungen und –erwägungen eine Herausforderung. Es wurden dennoch in Singapur sowie im Hamburger Hafen eine Vielzahl von ADCP Profilen gemessen, aus denen die Sedimentkonzentrationen im Fahrwasser ausgewertet werden konnte. Abbildung 7 zeigt eine dreidimensionale Darstellung von ADCP Schwebstoffkonzentrationsmessungen hinter einem Containerschiff am Tanjong Pagar Terminal in Singapur. Deutlich sind erhöhte Schwebstoffkonzentrationen zu erkennen. Abbildung 8 zeigt Ergebnisse von Messungen aus dem Hamburger Hafen, die von der HPA durchgeführt wurden. Die Schwebstoffkonzentration in dem gezeigten Fall überschritt 500 mg/l, in anderen Fällen wurden Schwebstoffkonzentrationen von über 1500 mg/l gemessen.

Parameter	Abkürzung	Einheit	Größen			
			1	3	5	∞
Kielfreiheit	UKC	m				
Propellerumdrehungen	RPM	Umdr/min	30	60	90	
Schiffsgeschwindigkeit	V	kn	0	6	12	
Rudderwinkel	Θ	°	-20	0	20	
Schiffsrumpf	-	-	Ja		Nein	
Propellerdurchmesser	D	m	9			
Propellertyp	-	-	Maersk S-Class			

Tabelle 1: Untersuchungsmatrix der CFD Szenariorechnungen

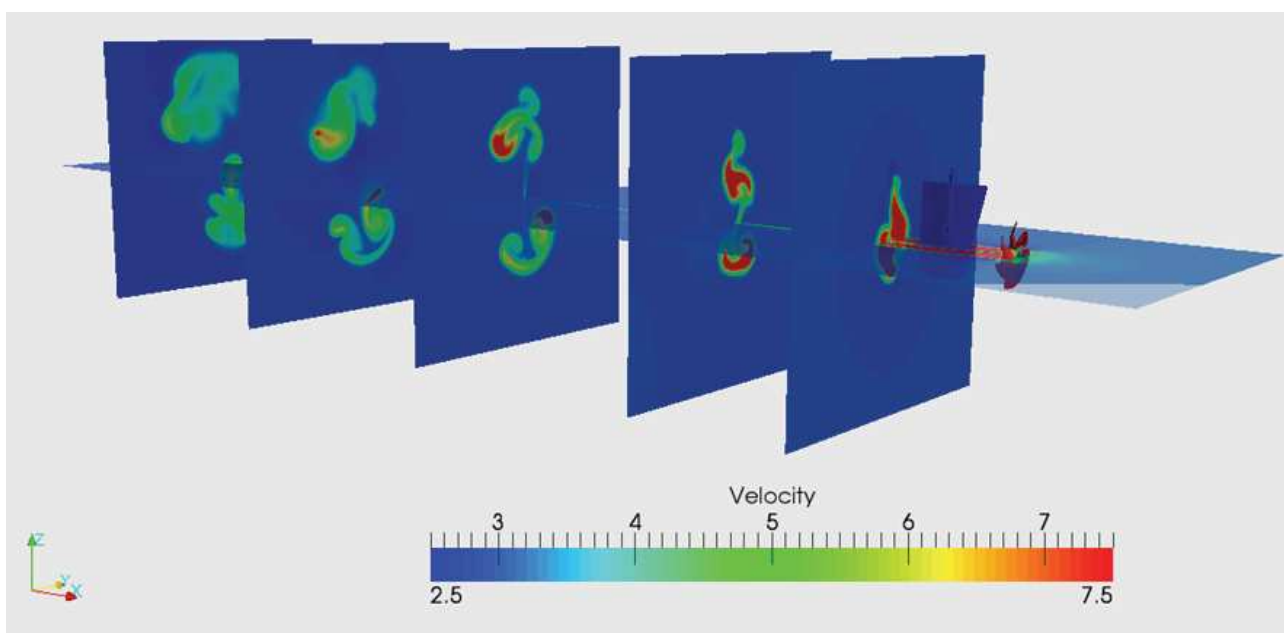


Abb. 5: Dreidimensionale Darstellung des Strömungsbildes im Propellerstrahl aus den CFD-Simulationen. Geschwindigkeit in m/s. Drehzahl= 60RPM, V=6 Knoten Wassertiefe=∞ und Ruderwinkel (theta)=0°

Schifffahrt und Wasserstraßen im Tiefwasserbereich

Einfluss des Schraubenstrahls aus Schifffahrt auf Sedimentresuspension und Sohlerosion

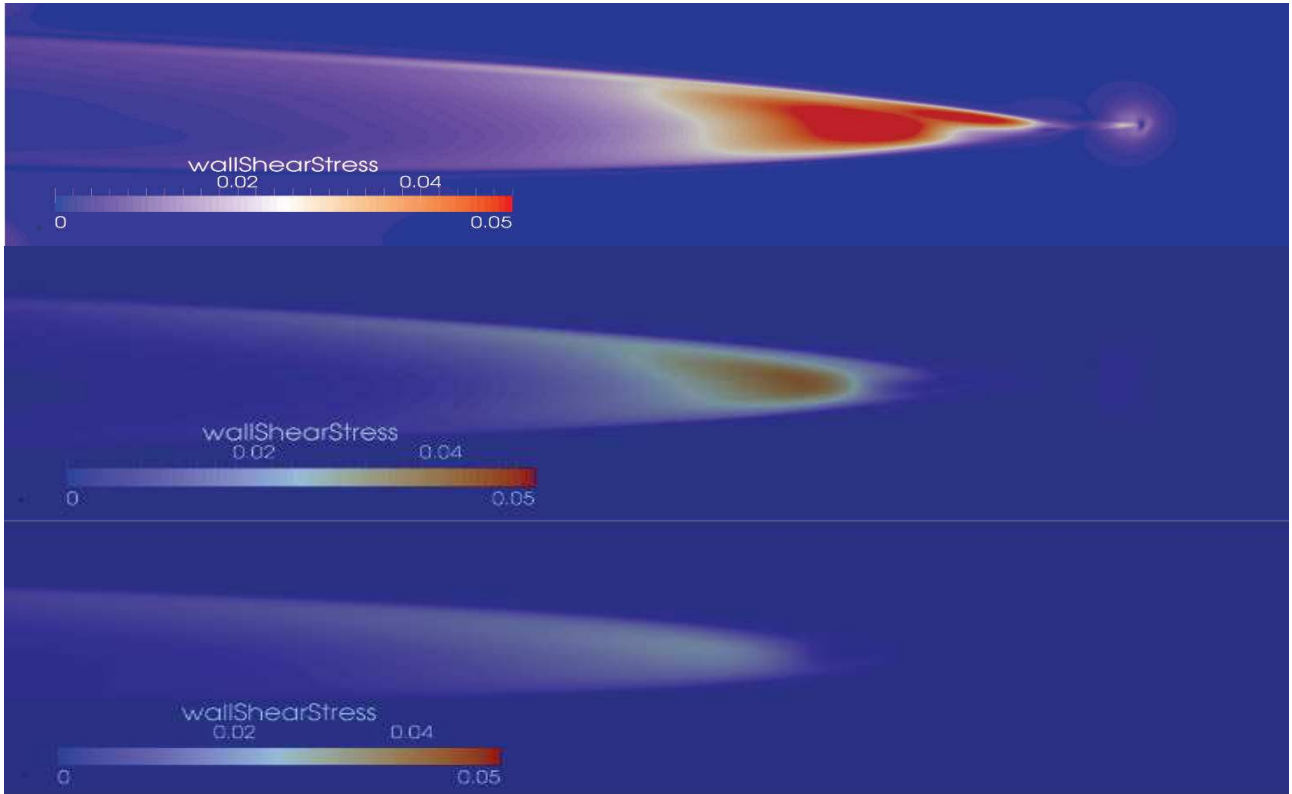


Abb. 6: Vergleichende Ergebnisse aus den CFD-Simulationen, hier: Auswirkung der Kieflfreiheit. Oben: 1 m UKC, Mitte: 3 m UKC, unten: 5 m UKC. Weitere Randbedingungen: 60 rpm, 6kn Schiffsgeschwindigkeit, Ruderwinkel θ 0°. Schubspannung in hPa.

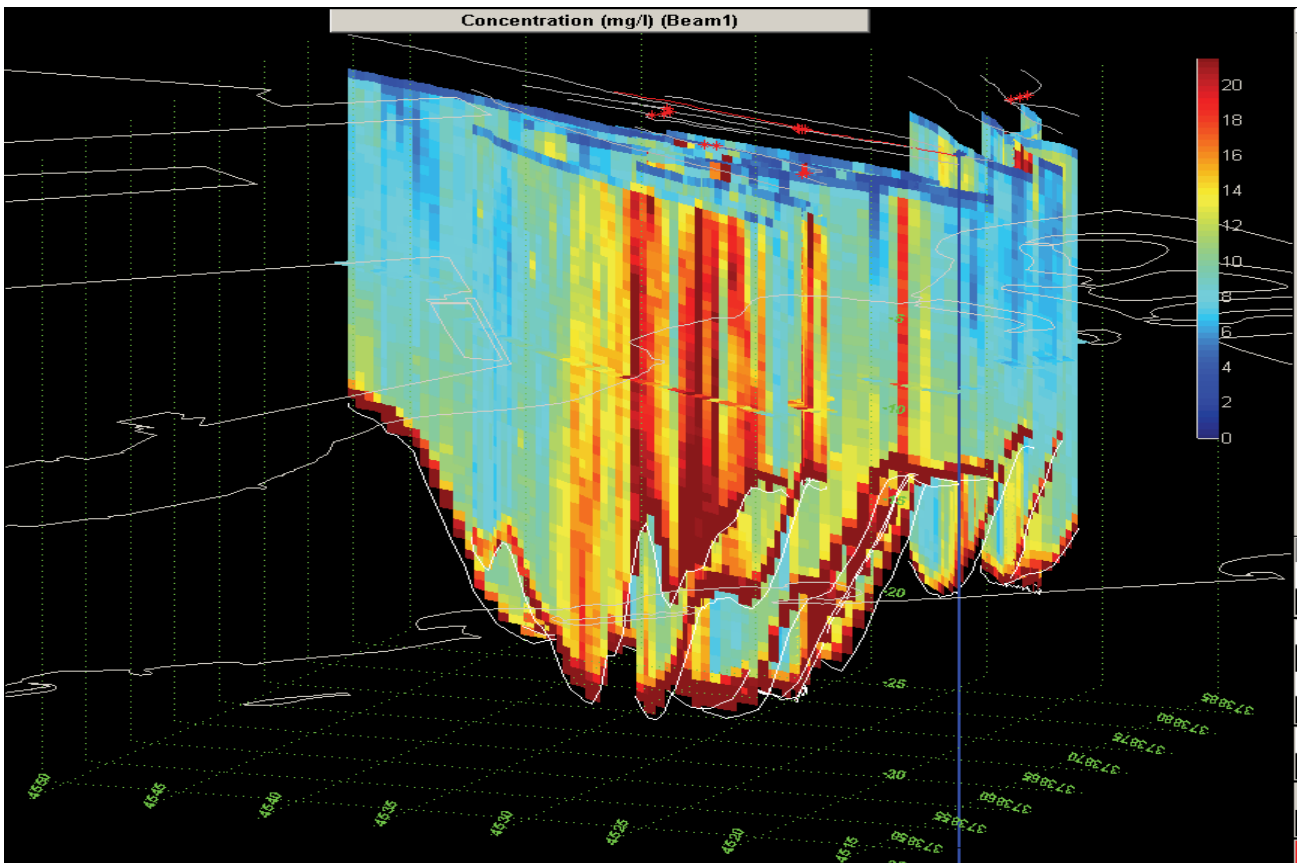


Abb. 7: Schwebstoffkonzentrationen hinter einem Containerschiff in Singapur, Tanjung Pagar Terminal.

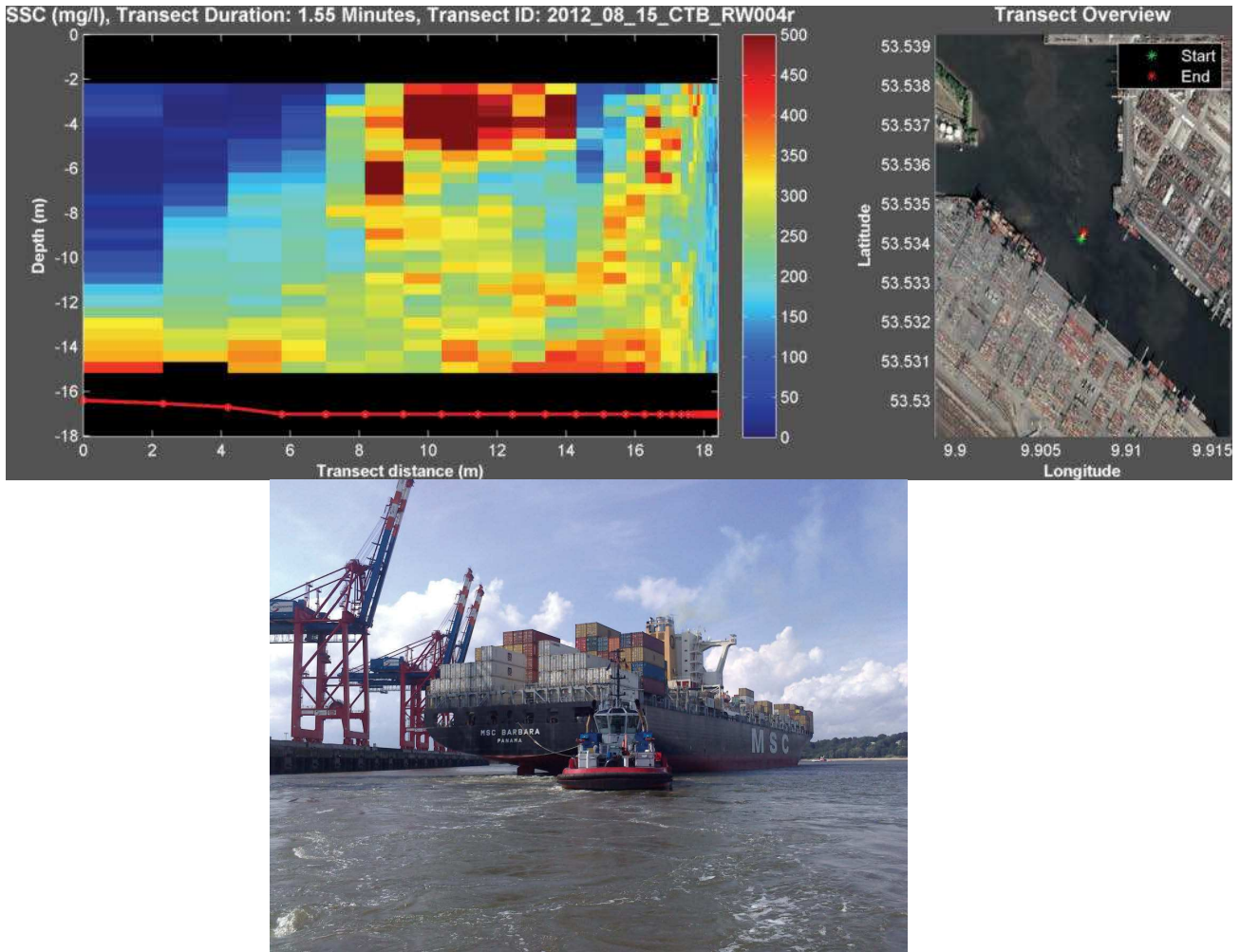


Abb. 8: Schwebstoffkonzentrationen hinter einem Containerschiff in Hamburg. Links Schwebstoffkonzentrationen, Mitte: Profillage, rechts: Ablegemanöver.

5. Großmaßstäbliche Modellierung

Während in CFD Simulationen nur Ausschnitte einzelner Schiffspassagen modelliert werden können, erfordert eine großmaßstäbliche Betrachtung der Auswirkungen des Schiffsverkehrs in seiner Gesamtheit andere Modellansätze.

Hierzu wurde ein dreidimensionales MIKE 3 Modell für die Tideelbe aufgebaut und mehrere Szenariofahrten zwischen Cuxhaven und Hamburg bei unterschiedlichen Tidezeitpunkten, sowie Manöverfahrten in Hamburg berechnet. Hierbei wurde das Sedimenttransportmodul MT und das Dredging Modul verwendet. Das Dredging Modul erlaubt die Erosion und Freisetzung einer Sedimentfracht über längere Strecken. Die Sedimentmengen wurden mit Hilfe der o.g. Messungen und eines vorgeschalteten Szenario Moduls berechnet. Das Modul berücksichtigt den Propellerdurchmesser D_p und Umdrehungszahl sowie die Kieffreiheit und Schiffsgeschwindigkeit. Die Werte für die Manöverfahrten wurden direkt aus den Messungen übernommen. Die Szenarien umfassen verschiedene Liegeplätze, aufkommende sowie abgehende Schiffe, unterschiedliche Tideverhältnisse und variable freigesetzte Schwebstoffkonzentrationen. Durch die Summierung werden die

Auswirkungen des Schiffsverkehrs in der Tideelbe erstmalig abgeschätzt, wobei nur die propellerinduzierten Sedimenttransporte betrachtet werden. Die Abb. 9 zeigt die Berechnung der Sedimentumlagerung bei einem Ablegemanöver am Containerterminal Altenwerder. Hierbei wurde nur die Fahrt in der Süderelbe bis in den Köhlbrand simuliert. Die gemessenen Konzentrationen während des Ablegemanövers betragen bis zu 1500 mg/l. Dies wurde im Modell berücksichtigt, bis sich das Schiff in Fahrt setzt. Dann reduziert sich der Schwebstoffgehalt der Elbe unmittelbar hinter dem Schiff auf rund 15 mg/l. Hierbei zeigt sich direkt an der Kaje und im Bereich der Manöverfahrt zunächst eine deutliche Erosion. Nach dem Umlagern der Sedimente bleibt ein Bereich mit erhöhter Sedimentation zurück. Diese finalen Umlagerungen zeigen sich auch auf einigen Fächerecholotpeilungen der HPA, ohne dass sie einem bestimmten Schiff oder Manöver zugeordnet werden konnten.

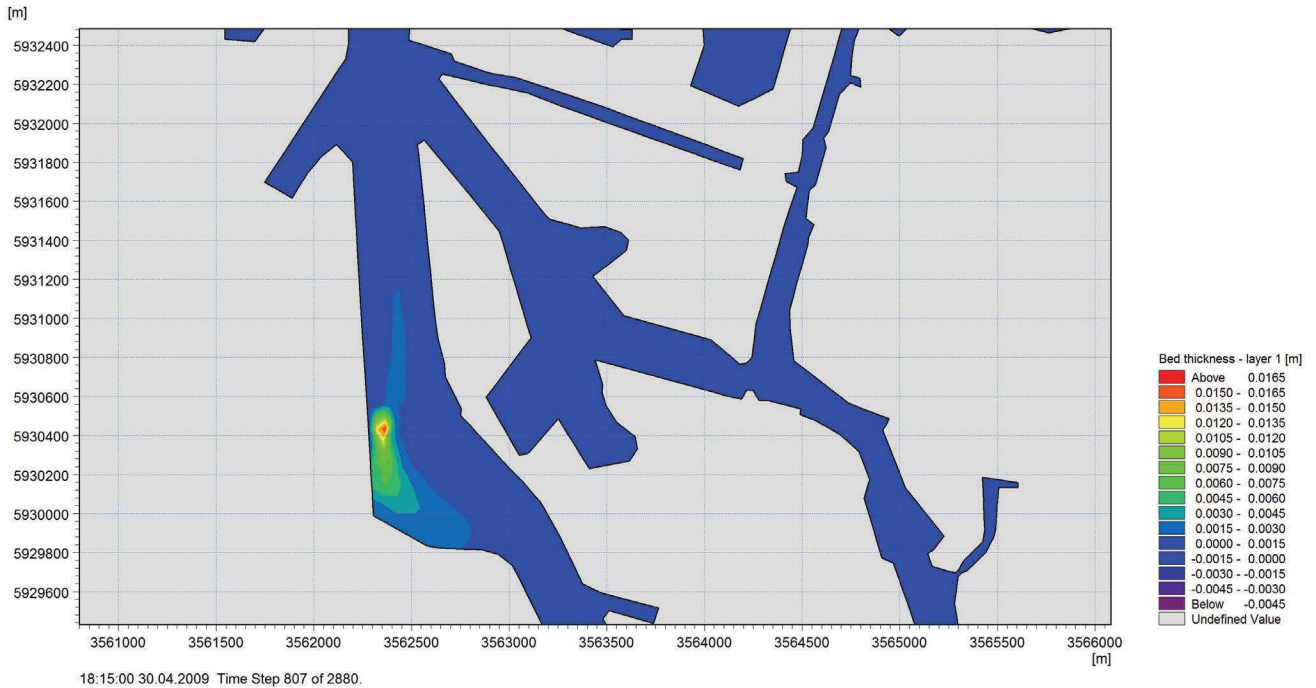


Abb. 9: Berechnete Sedimentumlagerung bei einem Ablegemanöver an der Containerkaje in Altenwerder (Track 4, 1500 mg/l abnehmend mit Fahrt auf 15 mg/)

Literatur

ALBERTSON M.L., DAI Y.B., JENSEN R.A., and ROUSE H.: Diffusion of a submerged jets. *Transcript of the ASCE (Paper No. 2409)*, (115), 639 – 697, 1950.

DHI: MIKE 3 Estuarine and Coastal Hydraulics and Oceanography. Scientific Documentation, Hørsholm, Dänemark, 2013.

LAM W., HAMIL G.A., SONG Y.C., ROBINSON D.J., AND RAGHUNATHAN S. a). A review of the equations used to predict the velocity distribution within a ship's propeller jet. *Ocean Engineering*, Elsevier, (38), 1-10, 2011.

OPENFOAM: The Open Source CFD Toolbox. User Guide, version 2.2.2, 2013, www.openfoam.org.

ULICZKA, K. UND KONDZIELLA, B., Dynamic response of very large containerships in extremely shallow water, Proceedings of the 31st PIANC Congress, Estoril, Spanien, 2006

Verfasser

Dr. Oliver Stoschek

DHI-WASY GmbH
Max-Planck-Straße 6
28857 Syke
Tel.: 04242/1638-18
E-Mail: ost@dhi-wasy.de

Dr. Elimar Precht

DHI-WASY GmbH
Max-Planck-Straße 6
28857 Syke
E-Mail: epr@dhi-group.de

Dr. Ole Larsen

DHI Water & Environment (S) Pte. Ltd., Singapur

Mamta Jain (Ph. D.)

DHI Water & Environment (S) Pte. Ltd., Singapur

Lars Yde (ChEng)

DHI Water & Environment (S) Pte. Ltd., Singapur

Dipl.-Ing. Nino Ohle

HPA Hamburg Port Authority
Neuer Wandrahm 4
20457 Hamburg
Tel.: 040/42847-0
E-Mail: nino.ohle@hpa.hamburg.de

Dipl.-Ing. Thomas Strotmann

HPA Hamburg Port Authority
Neuer Wandrahm 4
20457 Hamburg
Tel.: 040/42847-0
E-Mail: thomas.strotmann@hpa.hamburg.de

Erfahrungen mit der "Working-with-Nature" (WwN) Projektdatenbank und dem WwN Auszeichnungssystem

Dr. Elmar Fuchs

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Zusammenfassung

Die Working-with-Nature Philosophie WwN (Planen mit der Natur) ist mittlerweile eines der Ziele und ein Auftrag von PIANC. Um mehr Aufmerksamkeit für WwN zu gewinnen und die Übertragung der Philosophie in die Praxis zu fördern, rief PIANC Anfang 2012 die WwN Projektdatenbank das WwN Auszeichnungssystem mit dem *WwN Award* ins Leben. Die Datenbank veranschaulicht Projekte mit Vorbildcharakter, die erfolgreich WwN Elemente integriert haben. Über einen Fragenkatalog werden allgemeine Projektdaten sowie spezielle Informationen zu WwN Aspekten abgefragt. Ob die eingereichten Projekte WwN Kriterien erfüllen, wird von einer Jury aus unabhängigen Mitgliedern der einzelnen PIANC Kommissionen bewertet. Wenn positiv beschieden, können drei Arten von Auszeichnungen vergeben werden: das WwN Anerkennungszertifikat *Certificate of Recognition*, die Anwartschaft auf ein WwN Anerkennungszertifikat *Candidate for Certificate of Recognition* sowie die WwN Unterstützer Auszeichnung *Supporter of WwN*. Aus den Projekten mit Anerkennungszertifikat wird alle vier Jahre auf dem PIANC Weltkongress der erste Platz mit dem WwN Preis *WwN Award* ausgezeichnet. Seit 2012 sind 16 Projekte eingereicht worden, von denen 7 mit dem Anerkennungszertifikat, und jeweils eins mit der Anwartschaft bzw. dem Unterstützer Status ausgezeichnet wurden. Für die Ablehnung von 4 Projekten sind folgende Gründe zu nennen: ihre Umweltaspekte bestanden vornehmlich in Vermeidung, Minderung oder Kompensation, was keine Elemente der WwN Philosophie sind. Die Einbindung betroffener Interessensvertreter in die Projektplanungen als WwN Element wurde oftmals realisiert, während das Erlangen von Umweltverständnis vor der Projektplanung eher seltener, das Einbeziehen natürlicher Prozesse in die Projektrealisierung sogar kaum umgesetzt wurde. 65% aller eingereichten Projekte stehen jedoch für die Integration von WwN Elementen in die Praxis. Trotzdem gab es Missverständnisse im Auffassen der Kerngedanken von WwN, vor allem in der Frage, wie setze ich WwN in der Praxis um. PIANC muss demzufolge die WwN Inhalte im weltweiten Schifffahrtssektor verständlicher vermitteln. Praxisgerechte Hilfestellungen müssen gegeben und die Vorteile durch die Integration von WwN klar veranschaulicht werden. Maßgeblichen Anteil daran trägt die WwN Projektdatenbank. Somit ist jeder Projektmanager herzlich eingeladen ist, sein Projekt einzupflegen, um Teil der weltweiten WwN Gemeinschaft zu sein und davon zu profitieren (www.workingwithnature.pianc.org).

1. Planen mit der Natur/Working-with-Nature - eine ermutigende Philosophie

In ihrer über 100-jährigen Geschichte hat sich PIANC stets um aktuelle Anforderungen und Trends gekümmert, die sich aus der Entwicklung der Schifffahrt selbst und aus den gesellschaftlichen Ansprüchen ergeben

haben. PIANC stellt sich den neuen Herausforderungen, unterstützt zeitgemäß und praxisorientiert, ist damit richtungsweisend und anerkannt im internationalen Schifffahrtssektor.

Bislang hat sich die Beratungstätigkeit zumeist auf technische Aspekte der Hafen- und Wasserstraßeninfrastruktur konzentriert, Umweltaspekte spielten zunächst eine untergeordnete Rolle. Es ging darum, die Natur und Umwelt gegenüber den technischen Erfordernissen unter Kontrolle zu haben und zu halten.

Indessen wurde ökologischen Aspekten weltweit mehr Aufmerksamkeit geschenkt und sie gewannen an Bedeutung in Planung und Realisierung von Projekten, welche signifikante Auswirkungen auf die sie umgebende Natur haben. Man erkannte, dass eine Zerstörung oder Beeinträchtigung von Naturkapital in mittel- bis langfristiger Perspektive eine Beeinträchtigung der Lebensqualität für den Menschen mit sich bringt und Zusatzkosten für den Verlust von Ökosystemleistungen erzeugt. Weltweit brachte diese Erkenntnis in vielen Ländern eine Reihe von gesetzlichen Regelungen hervor, welche die Natur schützen und ggf. Kompensationen für negative Beeinträchtigungen festlegen.

Diese gesellschaftlichen Entwicklungen treffen mithin auch auf den Schifffahrtssektor zu. In der Vergangenheit war in der Projektrealisierung meistens die ingenieurtechnische Kontrolle aller Bedingungen die Maxime. Negative ökologische Auswirkungen wurden bestenfalls minimiert oder ausgeglichen. Im dargestellten Kontext führte dies zu komplexen Planungssituationen, die wiederum zu Verzögerungen, Sonderkosten und durchaus auch zu Frustrationen in der Realisierung von Schifffahrtsprojekten zur Folge hatten. Der Bedarf für einen neuen Ansatz wurde deutlich, der alle ein Schifffahrtsprojekt betreffenden Aspekte inklusive der Umwelt und Natur integriert.

Die Umweltkommission der PIANC hat für den Schifffahrtssektor im Jahr 2008 das sogenannte Working-with-Nature (WwN) Positionspapier entworfen und 2011 überarbeitet. Im Deutschen könnte man den Begriff WwN als "Planen mit der Natur" bezeichnen. WwN ist mittlerweile eines der übergreifenden Ziele und des Auftrags von PIANC.

WwN möchte ein Umdenken in Planung und Realisierung von Projekten im Wasserstraßen- und Hafenbau sowie ihrer Unterhaltung vermitteln und fördern (Fuchs 2011). Die gewohnte Art der Planung soll durch einen integrierenden Ansatz ersetzt werden, der alle projektbezogenen Inhalte gleichwertig behandelt, und das von den ersten Planungsschritten an. Damit sollen Win-Win-Situationen erzeugt werden, welche Umwelt und Natur einbeziehen und sowohl für den Projektbetreiber als auch für beteiligte Interessensvertreter akzeptierbar sind. Nunmehr können Projektziele in einem Ökosystemkontext erreicht werden anstatt ökologische Auswirkungen von starren vordefinierten Projektdesigns nur abzuschätzen, zu mildern, zu minimieren oder zu kompensieren. Vorhandene Vorgaben zur Durchführung von Umweltverträglichkeitsuntersuchungen unterstützen in der Tat eher den letztgenannten, nicht mehr ganz zeitgemäßen Ansatz.

WwN fordert von daher, Projektplanungsschritte in einer anderen Reihenfolge als bisher durchzuführen:

- (i) Projektbedarf und Ziele formulieren
- (ii) Umwelt und Natur verstehen
- (iii) Betroffene Interessensvertreter einbeziehen und Win-Win-Situationen identifizieren
- (iv) Projektplanung und -umsetzung ausarbeiten zum gemeinsamen Nutzen von Schifffahrt, Umwelt und Natur

WwN stellt einen praxisbezogenes Rahmenkonzept zur Entwicklung einer nachhaltigen Schifffahrtsinfrastruktur zur Verfügung. WwN wird von zahlreichen Organisationen wie CEDA, IADC, INE, und auch der Europäischen Kommission (EC 2012) unterstützt.

Da WwN ein recht neuer Ansatz für PIANC ist, muss es den Projektverantwortlichen im internationalen Schifffahrtssektor schrittweise und besonnen nahe gebracht werden. Um WwN bekannt und um seine Integration attraktiv zu machen, wurde auf Vorschlag der PIANC Umweltkommission (EnviCom) in 2012 die WwN Projektdatenbank eingerichtet sowie eine WwN Auszeichnungssystem aus der Taufe gehoben. Der *WwN Award* wird alle vier Jahre auf dem PIANC Weltkongress an ein Schifffahrtsprojekt verliehen, welches WwN Ideen ideal umgesetzt hat und damit als bestes und preisgekröntes Vorzeigeprojekt für WwN dienen kann.

2. Die WwN Projektdatenbank

2.1 Allgemeines

Das Hauptanliegen der WwN Projektdatenbank ist es, realisierte Schifffahrtsprojekte zu demonstrieren, welche Elemente der WwN Philosophie erfolgreich integriert haben. Die Sammlung der Fallstudien soll dabei helfen, mögliche Bedenken zur Berücksichtigung von WwN in eigenen Planungen zu relativieren. Erfolgreiche Fallstudien aus der WwN Datenbank können beispielsweise als eine Art Muster für eigene Projekte genutzt werden.

Zu Jahresanfang 2012 öffnete die PIANC Geschäftsstelle die Datenbank auf ihrer Webseite (www.workingwithnature.pianc.org). Weltweit wurden damit Projektmanager eingeladen, solche Schifffahrtsprojekte einzustellen, welche ihrer Meinung nach Win-Win-Situationen durch die Einbindung betroffener Interessensvertreter generieren, einen Nettogewinn für Umwelt und Natur mit sich bringen, Ökosystemleistungen sichern oder verbessern oder welche natürliche Prozesse mit in die Projektrealisierung einbeziehen. Neben generellen Projektinformationen sind in einem Online-Fragebogen insbesondere Auskünfte zu speziellen WwN bezogenen Fragen einzupflegen (siehe Kapitel 2.2).

Zunächst sind die eingetragenen Informationen nur für die sogenannte WwN-Jury sichtbar, welche sich aus Mitgliedern der einzelnen PIANC Kommissionen zusammensetzt. Die Jury befindet darüber, ob Elemente und Kriterien von WwN (siehe Kapitel 3.3) erfüllt sind. Bei positiver Entscheidung wird das jeweilige Projekt in den öffentlichen Teil der Datenbank überführt und ist damit öffentlich verfügbar.

2.2 Der Fragebogen

Benötigte Projektinformationen werden über einen Fragebogen erhoben, welcher vom Projektträger oder einem autorisierten Vertreter auszufüllen ist. In einem ersten Teil werden frage allgemeine Daten abgefragt wie zum Beispiel das Land, den Ort, das Hauptanliegen des Projektes für die Schifffahrt oder auch Kontaktinformationen des Einreichenden.

Im zweiten Teil werden projektspezifische Daten abgeprüft, welche die Projektumgebung betreffen (z. B. Klimaregion, Binnen- oder Küstenprojekt, Schutzgebiete), den Projekttyp darstellen (z. B. Neubau oder Unterhaltung) oder den gesetzlichen Planungsstand erläutern. Weitere Information zu Projektzielen und Planungsprozedur sollen dazu dienen, das Projekt vollständig zu erfassen. Aussagekräftige Bilder oder Grafiken können die eingegebenen Texte erläutern und hochgeladen werden.

Die Schlüsselfragen im dritten Teil des Fragebogens beziehen sich nun auf die Anwendung der WwN Philosophie im Projekt.

- (i) Wurden Schritte unternommen, das notwendige Verständnis für Umwelt und Natur zu erlangen, bevor die der technischen Projektplanung begonnen wurde?
- (ii) Wurden betroffene Interessensvertreter bereits in frühen Planungsstadien mit in die Auswahl möglicher Alternativen einbezogen?
- (iii) Konnten Win-Win-Lösungen gefunden werden?
- (iv) Wurde das Projekt so gestaltet, dass es natürliche Prozesse einbezieht und diese nutzt?
- (v) Erbrachte das Projekt Nutzen für Umwelt und Natur über die jeweiligen gesetzlichen Anforderungen hinaus?
- (vi) Verfolgte das Projekt die Planungsschritte, die im WwN Positionspapier dargestellt sind?

Abschließend wird der Antragsteller nach seinen Gründen für die Anwendung von WwN sowie den erfahrenen Vor- und Nachteilen gefragt. Informationen zu Kosten und zum gesetzlichen Rahmen runden das Projektbild ab.

2.3 Gegenwärtiger Stand

Seit Inbetriebnahme der WwN Projektdatenbank Anfang 2012 sind 16 Projekte aus Asien, Nordamerika und Europa eingereicht worden (Stand 01. März 2014) (Abbildung 1). Sie umfassen Projekte im Seehafenbau wie auch Binnenschifffahrtsprojekte und besitzen unterschiedlichste Dimensionen (Abbildung 2). Darunter sind viele Praxisprojekte, aber auch Studien- und Forschungsprojekte oder gesamte Programme. Die Projektumgebung illustriert Abbildung 3, den Anteil von Projekten in Schutzgebieten Abbildung 4.

Schutz des Lebensraumes, Eingriffsminderung und Renaturierung

Erfahrungen mit der „Working-with-Nature“ (WwN) Projektdatenbank und dem WwN Auszeichnungssystem

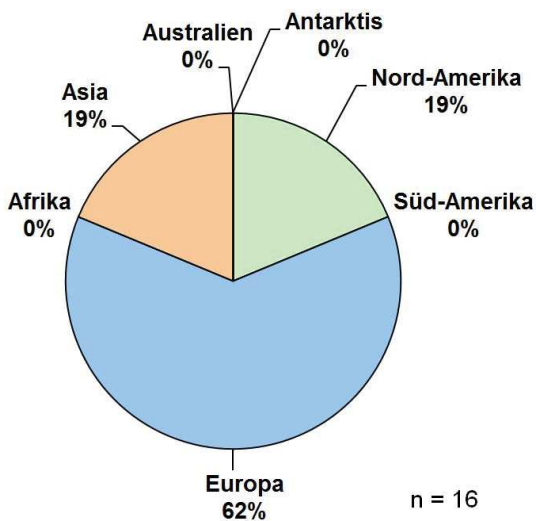


Abbildung 1: Zuordnung aller eingereichten Projekte zu Kontinenten (Stand 01. März 2014)

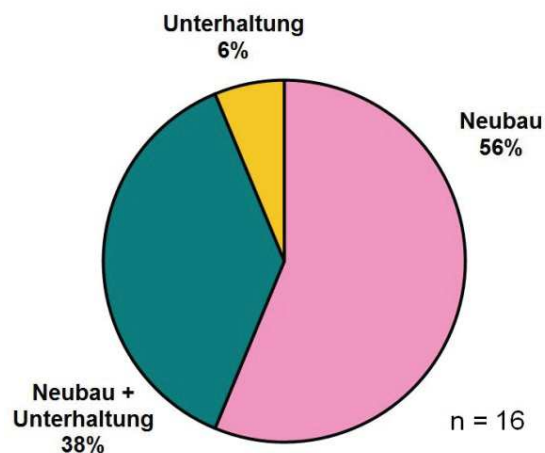


Abbildung 2: Zuordnung aller eingereichten Projekte zum Projekttyp (Stand 01. März 2014)

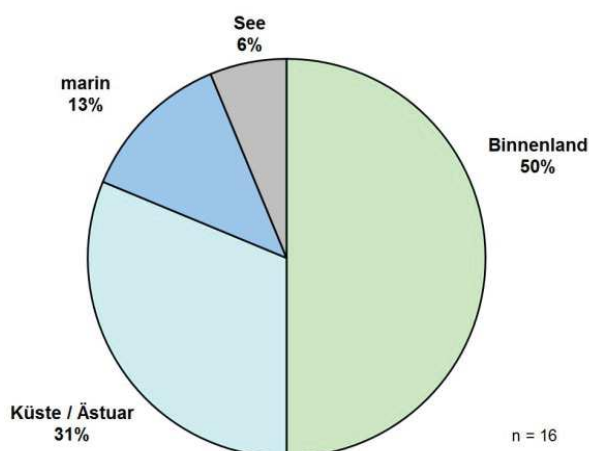


Abbildung 3: Zuordnung aller eingereichten Projekte zu ihrer Realisierungsumgebung (Stand 01. März 2014)

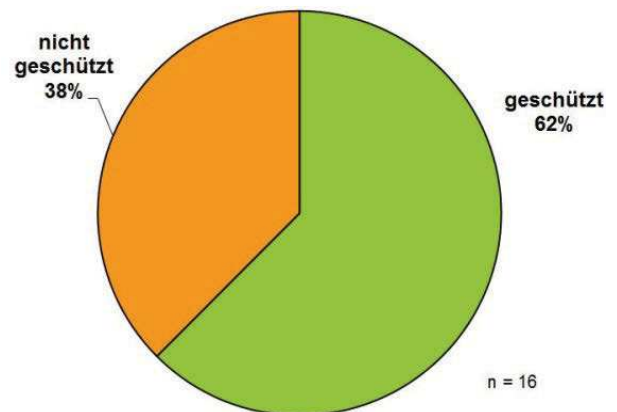


Abbildung 4: Zuordnung aller eingereichten Projekte zu geschützten Bereichen (Stand 01. März 2014)

3. Das System der WwN Auszeichnungen

Um die Umsetzung von WwN voran zu treiben und die daraus zu ziehenden Vorteile für Schifffahrtsprojekte zu verdeutlichen, hat PIANC auf Vorschlag ihrer Umweltkommission (EnviCom) einen Wettbewerb für WwN Projekte etabliert. Wird ein eingereichtes Projekt ausgezeichnet, kann der Projektbetreiber sein Projekt damit als innovativ bewerben und gibt gleichzeitig einen Anreiz für andere Projektmanager, WwN in eigenen Projekten einzusetzen.

Es können Auszeichnungen in vier Kategorien errungen werden:

- (i) das WwN Anerkennungszertifikat *Certificate of Recognition*
- (ii) das Anwärter auf ein WwN Anerkennungszertifikat *Candidate for Certificate of Recognition*
- (iii) die WwN Unterstützer Auszeichnung *Supporter of WwN*
- (iv) der WwN Preis *WwN Award* selbst

3.1 Das WwN Anerkennungszertifikat sowie die Anwärter Auszeichnung (*Certificate of Recognition, Candidate for Certificate of Recognition*)

Das WwN Anerkennungszertifikat wird an solche Projekte der WwN Projektdatenbank verliehen, welchen von der WwN Jury beschieden wurde, dass sie mindestens ein Element der WwN Philosophie im Projekt verwirklicht haben (Kriterien und Vorgehensweise siehe Kapitel 3.3). Für das Anerkennungszertifikat muss das jeweilige Projekt im Rahmen der jeweils geltenden gesetzlichen Bestimmungen bewilligt sein, d.h. das Projekt ist bereits umgesetzt oder es befindet sich in Realisierung. Für Projekte in Deutschland heißt das zum Beispiel, dass für Ausbauvorhaben ein Planfeststellungsbeschluss vorliegt oder dass nicht planfestzustellende Unterhaltung im Einvernehmen stattfindet.

Projekte, welche WwN Kriterien erfüllen aber noch keine entsprechenden Bewilligungen haben (sie können sich zum Beispiel in frühen Planungsstadien befinden), werden als Anwärter für ein WwN Anerkennungszertifikat ausgezeichnet. Liegen Bewilligungen vor, kann der

Status in das WwN Anerkennungszertifikat überführt werden.

Die Anerkennung eines Projektes wird dem Einreicher durch ein offizielles Schreiben der PIANC Geschäftsstelle in Brüssel mitgeteilt, ein repräsentatives Zertifikat mit dem entsprechenden Logo (siehe Abbildung 3) übersendet.

3.2 Die Auszeichnung WwN Unterstützer (Supporter of WwN)

Erfahrungen mit der WwN Projektdatenbank und der Evaluierung der enthaltenen Projekte haben gezeigt, dass für verschiedenste Projekte die Auszeichnungskategorien des Anerkennungszertifikats bzw. des Anwärter Status nicht anwendbar sind. Diese Auszeichnungen sind für Projekte vorgesehen, die in der Praxis umgesetzt werden oder sind und klare bzw. gängige schiffahrtsbezogene Ziele verfolgen. Andere Projekte beinhalten zwar WwN Elemente, sind jedoch wissenschaftliche Projekte, Studienprojekte, Programme oder Module innerhalb von Forschungskonsortien. Allen gemein ist, dass sie nicht Bestandteil der einschlägigen Praxisroutine des Wasserstraßen- und Hafenmanagements sind. Eingesetzte Elemente von WwN sind durchaus innovativ, sind aber noch nicht praxisreif und werden in der Praxis noch nicht als Standard eingesetzt (z. B. alternative Ufersicherungsmaßnahmen).

Ergebnisse solcher Projekte sind aber wichtig für die Entwicklung von WwN Aspekten und den Transfer von innovativen Methoden oder Techniken in die Praxis. Aus diesem Grund hat sich PIANC auf Vorschlag ihrer Umweltkommission (EnviCom) entschlossen, eine weitere Auszeichnung einzuführen, nämlich die des WwN Unterstützers (Supporter of WwN). Die Bewertung solcher Projekte erfolgt nach den gleichen Kriterien wie für reine Praxisprojekte. Nach positiver Evaluierung durch die WwN Jury werden die Projekte im öffentlichen Teil der WwN Datenbank publiziert, erkenntlich am Supporter of WwN Logo (siehe Abbildung 5). Der Erhalt der Auszeichnung wird dem Einreicher schriftlich durch PIANC Geschäftsstelle mitgeteilt.



Abbildung 5: Logos der WwN Auszeichnungen (von links nach rechts): Anerkennungszertifikat *Certificate of Recognition*, Anwärter auf ein Anerkennungszertifikat *Candidate for Certificate of Recognition*. Unterstützer *Supporter of WwN*

3.3 Bewertungskriterien und Vorgehensweise

Die Bewertung eingereicherter Projekte im Hinblick auf die Realisierung von WwN Aspekten wird durch eine sechsköpfige Jury aus unabhängigen Mitgliedern der PIANC Kommissionen vorgenommen. Den Vorsitz der Jury hat ein Mitglied der PIANC Umweltkommission (EnviCom).

Die individuelle Einstufung der einzelnen Juroren folgt einem quasi formalisierten Weg, bei dem auf Grundlage der Informationen des WwN Projektdatenbank-Fragen-

katalog der Erfüllungsgrad von WwN Kriterien abgeleitet wird. Bei offenen Fragen kann der Projekteinreicher über das interne Datenbanksystem kontaktiert werden, gegebene Antworten stehen allen Juroren zur Verfügung. Eine potenzielle Zuordnung eines Projekts für die Supporter Kategorie wird zwischen den Juroren abgestimmt, natürlich nicht die Bewertung selbst.

Die erste Einstufung, ob eine Projekt WwN Elemente beinhaltet oder nicht, wird an Hand der Antworten auf die WwN bezogenen Fragen (siehe auch Kapitel 2.2) möglich.

- (i) Verständnis von Natur und Umwelt
- (ii) Einbeziehung betroffener Interessensvertreter
- (iii) Schaffung von Win-Win-Situationen
- (iv) Einbeziehung natürlicher Prozesse
- (v) Nutzen für Natur und Umwelt über gesetzliche Anforderungen hinaus
- (vi) Planungsschritte der WwN Philosophie

In der Zusammenschau mit allen Projektinformationen prüft die zusammenfassende Bewertung, ob folgende vier WwN Hauptkriterien erfüllt sind, nämlich, ob das Projekt

- (1) Verständnis von Umwelt und Natur erlangt bevor die Projektplanung beginnt,
- (2) natürliche Prozesse einbezieht,
- (3) einen Nettogewinn für die Umwelt bringt und
- (4) betroffene Interessensvertreter einbeziehen, um Win-Win-Situationen zu schaffen.

Ist eines oder mehrere dieser Kriterien erfüllt, kann das Projekt als ein WwN Projekt angesehen werden. Der Entscheid über die Verleihung eines der Auszeichnungskategorien fällt durch Mehrheitsbeschluss in der WwN Jury.

3.4 Der WwN Preis *WwN Award*

Alle vier Jahre wird der Fortschritt in Anwendung und Entwicklung von WwN in der Praxis mit der Verleihung des *WwN Award* auf dem PIANC Weltkongress gewürdigt. Die Auswahl findet unter denjenigen Projekten der WwN Datenbank statt, die ein WwN Anerkennungszertifikat *Certificate of Recognition* in den vor dem jeweiligen Weltkongress liegenden vier Jahren erhalten haben. Auf Grundlage einer individuellen Reihenfolge der WwN Jury Mitglieder wählt ein Team der PIANC Geschäftsführung unter Leitung des Vizepräsidenten die drei ersten Gewinnerprojekte aus. In einer eigenen WwN Session auf dem Weltkongress können sich die drei Projekte dem Konferenzpublikum präsentieren. Dem Gewinner des ersten Platzes wird ein Pokal zum ständigen Verbleib verliehen.

4. Ergebnisse und Erfahrungen

4.1 WwN Auszeichnungen

Wie schon in Kapitel 2.3 dargestellt, sind seit Inbetriebnahme der WwN Datenbank Anfang 2012 sechzehn Projekte eingereicht worden (Stand 01. März 2014). In

Schutz des Lebensraumes, Eingriffsminderung und Renaturierung

Erfahrungen mit der „Working-with-Nature“ (WwN) Projektdatenbank und dem WwN Auszeichnungssystem

den Projekten werden verschiedenste wasserbauliche Ziele und WwN Elemente adressiert. Dazu gehören die wertbringende Verwendung von Baggergut, der Einsatz von biologischen Materialien und Prozessen für wasserbauliche Zwecke, die Nutzung hydromorphologischer Prozesse zum Management der Fahrrinne, die Gestaltung und Sicherung naturnaher Ufer durch "Bio-Engineering", die Anlage, Verbesserung oder Verlagerung von Fluss- und Auenhabitaten, das Schaffen von Überflutungsräumen, der Schutz von Korallenriffen, die Anlage naturnaher Flussbauwerke oder auch Renaturierungen.

In den einzelnen Projekten wird die WwN Philosophie offensichtlich unterschiedlich aufgefasst und realisiert. Von allen 16 Projekten haben sieben das WwN Anerkennungszertifikat erhalten, ein Projekt ist Anwärter darauf, ein Projekt erhielt die WwN Unterstützer Auszeichnung. Für drei Projekte liegt noch keine vollständige Bewertung der WwN Jury vor, vier Projekte wurden abgelehnt (siehe Abbildung 6). Gründe dafür waren, dass ihr umweltbezogene Part vorwiegend in Vermeidung, Minderung oder Ausgleich von ökologischen Schäden lag, was nicht im Sinne der WwN Philosophie ist. Bemerkenswerte 65% der eingereichten Projekte stehen für die erfolgreiche Anwendung von WwN Elementen.

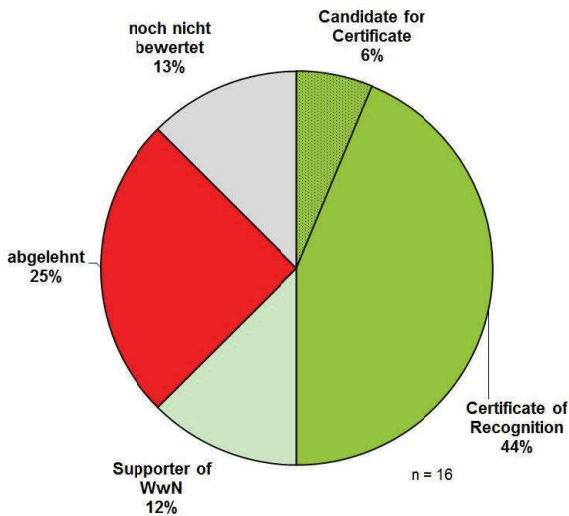


Abbildung 6: Ergebnisse der Bewertungen aller eingereichten Projekte (Stand 01. März 2014)

Bezogen auf die kontinentale Verteilung wurden 100% der nordamerikanischen Projekte zertifiziert und 50% der europäischen. 20% der Projekte aus Europa wurden abgelehnt, 66% der Projekte aus Asien.

Auch die räumliche Umgebung, in welcher das Projekt realisiert wurde, spielt offensichtlich beim Einsatz von WwN Elementen eine Rolle (siehe Abbildung 7).

Die Binnenlandprojekte legen offensichtlich mehr Wert auf WwN Kriterien als die marinen und die Küsten- oder Ästuarprojekte. Liegen die Projekte in Schutzgebieten, ist der Anreiz, WwN Aspekte zu integrieren, deutlich größer als in nicht geschützten Gebieten (Abbildung 7). Das deutet darauf hin, dass in geschützten Gebieten die Umweltvorsorge auch auf Grund von gesetzlichen Auflagen eine große Rolle spielt, insbesondere, da mit negativen Konsequenzen zu rechnen ist, wenn ökologische Aspekte nicht ausreichend beachtet werden.

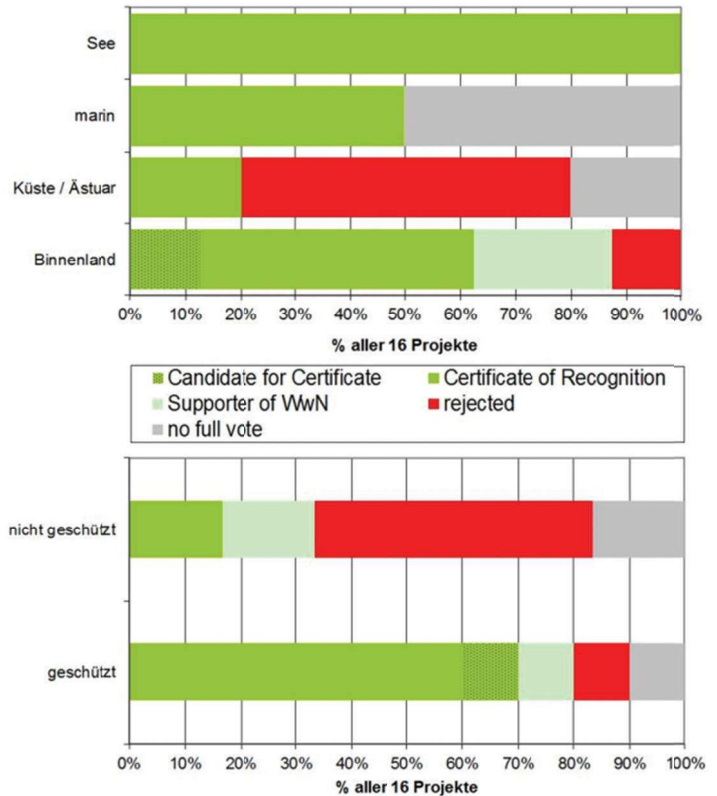


Abbildung 7: Ergebnisse der Bewertungen aller eingereichten Projekte (Stand 01. März 2014) in Bezug auf ihre räumliche Umgebung (oben) und den Schutzstatus (unten)

4.2 Erfahrungen

Analysiert man die Datenbankeinträge und die Bewertungsergebnisse im Hinblick auf Berücksichtigung von WwN Hauptkriterien (siehe Kapitel 3.3), so zeichnet Abbildung 8 ein Bild davon, welche der WwN Kriterien leicht angenommen wurden und welche nicht.

Das Projekt ...	Erfüllungsgrad
erlangt Verständnis von Umwelt und Natur vor Beginn der Projektplanung	
bezieht natürliche Prozesse ein	
bringt einen Nettogewinn für die Umwelt	
bezieht betroffene Interessensvertreter ein, um Win-Win-Situationen zu schaffen	

■ keiner
 ■ gering
 ■ mittel
 ■ hoch

Abbildung 8: Erfüllungsgrad in der Realisierung von WwN Kriterien aller eingereichten Projekte (Stand 01. März 2014)

Gängige Praxis ist die Integration betroffener Interessensvertreter in den Planungsprozess mit dem Ziel, Win-Win-Situationen zu erarbeiten. 81% der 16 eingereichten Projekte haben diese Aufgabe realisiert. Auf Grund vorhandener Umweltgesetzgebung in vielen Ländern und den daraus stammenden Anforderungen an Projektplanung und -realisierung ist eine integrierte Projektplanung oftmals verpflichtend, auch für schifffahrtsbezogene Vorhaben. Win-Win-Situationen sind überwiegend innerhalb des Komplexes Schifffahrt, Hochwasserschutz, Naturschutz und Tourismus geschaffen worden.

Der Vorteil, Umwelt und Natur vor Planungsbeginn zu verstehen, ist offensichtlich von den meisten Projektmanagern verstanden. Nur ein Drittel der Projekte zeigen eine schwache Wahrnehmung von Umwelt und Natur in frühen Projektplanungsstadien.

Im Gegensatz dazu ist das Einbeziehen von natürlichen Prozessen in das Erreichen der eigentlichen schifffahrtsbezogenen Ziele wenig realisiert. 44% der Projekte nutzen natürliche Prozesse gar nicht oder nur zu einem geringen Ausmaß. Grund dafür könnte im mangelnden Wissen und in der geringen Erfahrung in diesem recht neuen Feld des Wasserstraßen- und Hafenbaus liegen. Ein Nettogewinn für die Umwelt konnte jedoch immerhin in zwei Dritteln aller 16 Projekte erzielt werden.

Im Hinblick auf die Kapitalinvestitionen sind die Projekte mit WwN Ansatz offenbar kostenintensiv. Die Hälfte aller Projekte bescheinigt, dass ihre Kosten mit WwN höher gegenüber der gewohnten Planungsweise sind. Nur ein Drittel hatte keine Sonderausgaben (Abbildung 9). Gleichzeitig konnte aber in 44% der eingereichten Projekte festgestellt werden, dass durch die Anwendung von WwN Elementen langfristig ein monetärer Vorteil erwartet wird, welcher die anfänglichen höheren Investitionskosten möglicherweise kompensiert (Abbildung 10).

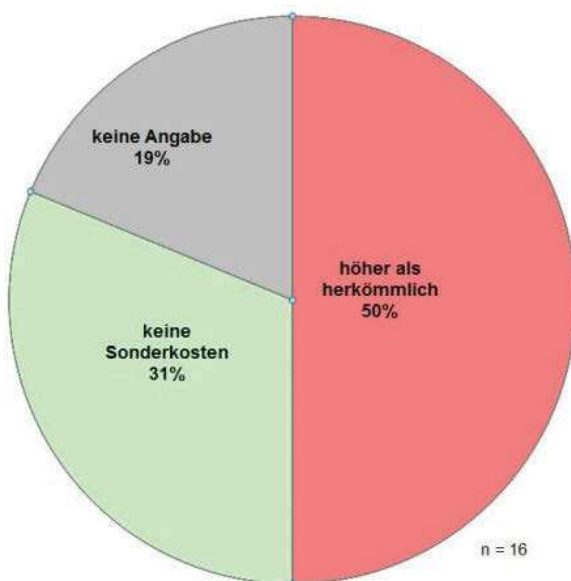


Abbildung 9: Auswirkungen auf Investitionskosten bei WwN Projekten, alle eingereichten Projekte (Stand 01. März 2014)

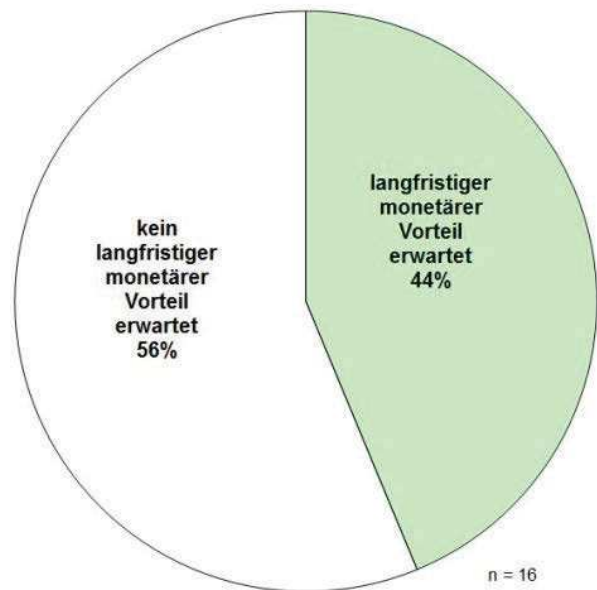


Abbildung 10: Abschätzung des langfristigen monetären Vorteils (rechts) bei WwN Projekten, alle eingereichten Projekte (Stand 01. März 2014)

5. Empfehlungen

Aus den ersten zweijährigen Erfahrungen mit der WwN Projektdatenbank und der Projektbewertung kann gelesen werden, dass viele Projektmanager WwN Aspekte in ihren Projekten verwendet haben, ohne zu wissen, dass WwN existiert. Zunächst kann dies als positives Signal für ein heutiges modernes und nachhaltiges Wasserstraßen- und Hafenmanagement gesehen werden.

Auf der anderen Seite gibt es offensichtlich aber auch ein Missverständnis der Kerngedanken von WwN. Etwas für die Natur zu tun im Sinne von Vermeidung, Minderung oder Kompensation ist nicht der Schlüssel zu WwN. Eine solche Wahrnehmung bewahrt eher die konventionelle Vorgehensweise in Projektplanung und -realisierung. Win-Win-Situationen werden dabei nicht erzeugt.

Für PIANC heißt dies aber auch, dass die WwN Philosophie und vor allem ihre Anwendung in der Praxis noch mehr erläutert werden muss. Diesem Manko kann beispielsweise durch eine Art Übersetzung der WwN Philosophie in eine praktische Handlungsanweisung begegnet werden. Die WwN Datenbank mit ihren Demonstrationsprojekten im öffentlichen Teil ist ein erster Schritt dazu. Ein Report der EnviCom in Form einer praxisorientierten Anleitung kann diesen Prozess weiter nach vorne bringen.

Dies geht mit der Erkenntnis einher, dass offensichtlich das Wissen zum Einbeziehen natürlicher Prozesse in Wasserstraßen- und Hafenprojekte nicht ausreichend vorhanden ist bzw. abgefragt werden kann. Der erforderliche Zugewinn von Wissen muss und kann in entsprechenden Forschungsprojekten oder Pilotmaßnahmen erlangt und demonstriert werden (Fuchs 2010). PIANC sollte mit erfolgreichen Beispielen zeigen, dass die Nutzung von natürlichen Prozessen im Wasserbau wirklich funktionieren kann. Der erwähnte Report kann als Mittel dazu verwendet werden.

Werden eingereichte Projekte abgelehnt, müssen die Gründe dafür klar dargelegt werden und den Projektmanagern Empfehlungen gegeben werden, wie verstärkt im Sinne von WwN gehandelt werden kann.

Ein wichtiger Aspekt muss auf alle Fälle mehr beworben und verbreitet werden: werden WwN Elemente im Projekt angewendet, manchmal zunächst kostenintensiver als im gewohnten Ansatz, sind langfristig Einsparungen zu erwarten und in jedem Fall an gesellschaftlicher Akzeptanz zu gewinnen. Dies ist ein klares Ergebnis der ersten Phase der WwN Projektdatenbank und Projektanalyse.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Transfer der WwN Philosophie in die Praxis teilweise erreicht ist, vorwiegend in wohlüberlegten und gut durchdachten Projekten. Anderenfalls ist WwN eher indirekt zufällig in die Projektplanung eingeflossen. Das heißt, dass in Zukunft WwN Elemente in Praxisprojekte mehr aktiv eingebracht werden müssen. Für PIANC bedeutet dies, dass WwN im weltweiten Schiffahrtssektor beworben werden muss. Die WwN Inhalte müssen dabei verständlich vermittelt werden, praxisgerechte Hilfestellungen gegeben und die Vorteile durch die Anwendung von WwN klar veranschaulicht werden.

Ein Teil davon ist die WwN Projektdatenbank und das WwN Auszeichnungssystem. Damit ist jeder Projektmanager herzlich eingeladen, sein Projekt in die WwN Datenbank (www.workingwithnature.pianc.org) einzupflegen und letztlich davon zu profitieren, Teil der weltweiten WwN Gemeinschaft zu sein.

Literatur

EC: Guidance document on sustainable inland waterway development and management in the context of the EU Birds and Habitats Directives. European Commission. Brussels, 2012

FUCHS, E.; ROSENZWEIG, S.; M. SCHLEUTER: Planning with Nature – How Ecological Modelling can support Waterway Engineering Projects. 32nd PIANC Congress, 125 Anniversary, Liverpool 10 -14 May 2010. Book of Abstracts, ISBN 978-2-87223-179-9, pp.13-14, 2010

FUCHS, E.: The PIANC “Working with Nature” Philosophy for integrated Waterway Planning and the

essential need of hydro-ecological knowledge. in: HydroEco 2011, Hydrology and Ecology: Ecosystems,

Groundwater and Surface Water – Pressures and Options, Volume of Abstracts, ed.: H.P. Nachtnebel and

K. Kovar, ISBN 978-3-900962-95-1, p.129, 2011

PIANC: Working with Nature. PIANC Position Paper. October 2008, revised January 2011.

<http://www.pianc.org/wwnpositionpaper.php>.

Verfasser

Dr. Elmar Fuchs

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Referat U2 Ökologische Wirkungszusammenhänge

Am Mainzer Tor 1

56068 Koblenz

Tel.: 0261 /1306-5308

E-Mail: fuchs@bafg.de

Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen - eine Herausforderung in mehrfach genutzten Flüssen

Dr. Matthias Scholten

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Dipl.-Biol. Christian von Landwüst

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Dr. Roman Weichert,

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Prof. Dr. Jochen Koop

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Dr. Dorothe Herpertz

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Zusammenfassung

Große Flüsse unterliegen weltweit einer vielfachen Nutzung, u.a. durch Schifffahrt, Energieerzeugung, Fischerei und Tourismus. Schleusen, Wehre und Staudämme haben dabei einen signifikanten Einfluss auf das System und damit auf die aquatischen Organismen, insbesondere die Wanderfische aber auch auf den natürlichen Sedimenttransport. Mit der Verabschiedung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) wird das Ziel verfolgt, die Ressource Wasser nachhaltig zu schützen und die Nutzung der Gewässer mit der Erhaltung eines guten oder sehr guten ökologischen Zustands bzw. mit der Entwicklung eines guten ökologischen Potenzials zu verbinden. Aufgrund der großen Relevanz der aquatischen Fauna ist die Durchgängigkeit der Fließgewässer ein Schlüssel, um die Ziele der WRRL in den Fließgewässern zu erreichen.

An den Bundeswasserstraßen stellt die Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit eine doppelte Herausforderung dar: Zum einen sind aufgrund knapper finanzieller und personeller Ressourcen Maßnahmen bundesweit an mehr als 250 Standorten zu priorisieren, wobei sowohl die Ziele der WRRL als auch die unterschiedlichen Nutzungen zu berücksichtigen sind. Zum anderen erfordert die konkrete Maßnahmenumsetzung an den einzelnen Standorten sowohl ein hydraulisch-technisches als auch ein biologisches Wissen, um funktionsfähige Fischaufstiegsanlagen in vorhandene Bauwerke integrieren zu können. Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, wurden sowohl auf Ebene des Bundes als auch auf lokaler Ebene Strategien und Ansätze entwickelt, um eine effiziente und zielgerichtete Maßnahmenumsetzung in einer mehrfach genutzten Wasserstraße zu gewährleisten.

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) entwickelte unter Einbindung der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) eine bundesweite Umsetzungsstrategie. Dieser Prozess wurde durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) anhand der Ableitung einer fischökologischen Dringlichkeit und unter Berücksichtigung der fachlichen Handlungskonzepte der Bundesländer sowie den gemeinsam mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) zusammengestellten fachlichen Grundlagen maßgeblich unterstützt. Durch eine Verschneidung regionaler Umsetzungskonzepte der WSV und unter Berücksichti-

gung weiterer politischer und ökonomischer Aspekte erfolgte eine grundlegende Maßnahmenpriorisierung durch das BMVI. Der methodische Ansatz; die fachlichen Kriterien sowohl für die Klassifikation der Dringlichkeit aus fachlich-fischökologischer Sicht als auch für die bundesweite Priorisierung von Durchgängigkeitsmaßnahmen an Bundeswasserstraßen werden erläutert.

Eine neue Fischaufstiegsanlage (FAA) in eine existierende Stauanlage zu integrieren, stellt eine technische aber auch ökologische Herausforderung dar. So ist beispielsweise die Auffindbarkeit der FAA durch die exakte Position der Einstiege sowie die Anbindung an den Wanderkorridor im Unterwasser anhand einer geeigneten Leitströmung zu gewährleisten. Die ökologische Effizienz der FAA gerät hier in ein Spannungsfeld mit anderen Nutzungen wie z.B. der Wasserkraftnutzung, da zur Erzeugung einer Leitströmung zusätzliches Wasser benötigt wird, dass häufig nicht mehr zur Energieerzeugung zur Verfügung steht. Die Entwicklung einer ökohydraulischen Strategie zum Umgang mit unterschiedlichen Nutzungsinteressen ist demzufolge erforderlich. Weiterhin sind Forschungsprojekte notwendig, die auf die Analyse der Interaktion Fisch-Hydraulik zielen, z. B. um eine optimale Funktion der FAA ohne eine signifikante Einschränkung der Nutzung der Flüsse (z. B. zur Energieerzeugung) zu gewährleisten.

1. Hintergrund und Ziele

Flüsse stellen als Element des globalen Wasser- und Nährstoffkreislaufs sowie als Quelle für Trinkwasser und Nahrung (z. B. durch die fischereiliche Nutzung) sowie als Transportwege grundlegende ökosystemare Dienstleistungen zur Verfügung (UN-Report 2005). Aus diesem Grund bilden Flussläufe schon seit Jahrtausenden den Ausgangspunkt für menschliche Ansiedlungen, für Handel und Wirtschaft. Heute bilden sie die Basis für die Entwicklung großer industrieller Gebiete und Knotenpunkte für weltweiten Handel und ökonomische Entwicklung und Wohlstand. Gleichzeitig sind große Flüsse aber auch Orte von großer biologischer Vielfalt. Eine ausgeprägte hydromorphologische Variabilität führt zu einem Set von teilweise extremen Lebensräumen in denen sich in Jahrtausenden unterschiedlichste Lebensstrategien entwickeln konnten.

Sozioökonomische und soziokulturelle Aktivitäten befördern eine vielfache Nutzung der Flüsse, z. B. für die Schifffahrt, Energieerzeugung, Fischerei und Tourismus und verursachen signifikante Veränderungen der Hydromorphologie und des ökologischen Status der Flüsse in Europa und weltweit. So beeinflussen beispielsweise Querbauwerke die Entwicklung und Vielfalt der Lebensräume und beeinträchtigen die Wanderungen von Fischen und anderen aquatischen Organismen. Dies verursacht, z. T. in Kombination mit anderen Faktoren wie z. B. einer schlechten Wasserqualität und einer intensiven Fischerei den Rückgang und das lokale Erlöschen von Fischpopulationen (Ward et al. 2002).

Als Teil der Bundeswasserstraßen, welche freifließende, gestaute und künstliche Kanäle sowie die seawärtigen Anbindungen der Häfen umfassen, bilden alle großen deutschen Flüsse die Hauptverbindungsachsen zwischen den marinen Lebensräumen bzw. den Flussunterläufen und den Quellbächen und Zuflüssen im

Schutz des Lebensraumes, Eingriffsminderung und Renaturierung Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen - eine Herausforderung in mehrfach genutzten Flüssen

oberen Bereich der Einzugsgebiete. Mehr als 2/3 der heimischen Arten gehören zu den Wanderfischen, von denen die diadromen Arten wie Lachs und Meerforelle ihre Laichgebiete in den Zuflüssen und ihre Aufwuchsräume in den marinen Gebieten des Nord-Ost Atlantik und der Nordsee haben. Eine große Artenzahl bilden die potamodromen Arten, die innerhalb der Flüsse teilweise Wanderungen über hunderte von Kilometern durchführen, um z. B. geeignete Laichgebiete sowie Nahrungs- und Überwinterungshabitats zu erreichen (Lucas & Barras 2001).

In der heutigen Zeit wird es gesellschaftlich erwartet, dass es eine Balance zwischen den wirtschaftlichen Funktionen der Wasserstraßen und angemessenen ökologischen Standards gibt. In diesem Kontext markiert die Verabschiedung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie im Jahr 2000 den Beginn einer neuen Ära der Wasserbewirtschaftung mit Auswirkungen auch auf das Management der Bundeswasserstraßen. Die WRRL erfordert eine ganzheitliche, einzugsgebietsweite Bewirtschaftung der Wasserkörper. Im Gegensatz zu den Richtlinien des Naturschutzes bilden dafür sowohl die Ökologie als auch die Nutzung der Gewässer den Ausgangspunkt (BMU 2010). Vor diesem Hintergrund stellen sich an die Bundeswasserstraßen als „Rückgrat“ des Einzugsgebiets besondere Herausforderungen und Chancen als vielfach genutzte Flüsse.

Die WRRL fordert die Erreichung des „guten ökologischen Zustands“ natürlicher Gewässer bzw. „des guten ökologischen Potenzials“ erheblich veränderter und künstlicher Gewässer bis 2015. Dies bedeutet sowohl eine hohe Wasserqualität als auch adäquate und erreichbare Lebensräume für Flora und Fauna. In manchen Fällen erlaubt die Richtlinie Ausnahmen. So ermöglicht sie in begründeten Fällen eine Verlängerung der Zielerreichung bis zum Ende des zweiten bzw. dritten Bewirtschaftungszyklus (2021 bzw. 2027). Die WRRL sieht explizit eine Berücksichtigung der Gewässernutzung wie z. B. Trinkwassergewinnung, Schifffahrt und Energieerzeugung vor. Entsprechend wird für hydromorphologisch stark durch Nutzungen verändert Wasserkörper, z. B. zahlreiche Abschnitte von Bundeswasserstraßen, die Möglichkeit eingeräumt, sie als „erheblich veränderte Wasserkörper“ auszuweisen (BMU 2010). Das für diese Wasserkörper angestrebte „gute ökologische Potenzial“ berücksichtigt gemäß WRRL die physikalischen Bedingungen, die sich aus den erheblich veränderten Eigenschaften des jeweiligen Wasserkörpers ergeben.

In den Bewirtschaftungsplänen und Maßnahmenprogrammen für die einzelnen Einzugsgebiete werden die notwendigen Maßnahmen spezifiziert, die für die Erreichung des guten ökologischen Zustands bzw. des guten ökologischen Potenzials erforderlich sind. Der aktuelle Status jedes Oberflächenwasserkörpers wird anhand biologischer Qualitätskomponenten (Fischfauna, Wirbellose, aquatische Flora) bewertet. Diese Bewertung wird durch hydromorphologische (Wasserhaushalt; ökologische Durchgängigkeit sowie die allg. Gewässerstruktur) und chemische Qualitätskomponenten unterstützt.

Die Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit speziell für den Fischauf- und -abstieg ist eine entscheidende Voraussetzung für die Verbesserung der Lebensbedingungen in den Gewässern. Entsprechend

stellt die ökologische Durchgängigkeit in den europäischen Bewirtschaftungsplanungen ein wesentliches Kriterium auf dem Weg zur Zielerreichung gemäß WRRL dar (BMU 2010). Ökologische Durchgängigkeit heißt - neben der Erreichung der Durchgängigkeit für Fische - auch einen möglichst ungehinderten Sedimenttransport und die Wanderung weiterer aquatischer Organismen zu gewährleisten. Gleichwohl konzentrieren sich viele Maßnahmen in Europa derzeit auf den Bau von Fischauf- und -abstiegsanlagen.

In Deutschland wurde die WRRL in erster Linie durch das Wasserhaushaltsgesetz des Bundes (WHG) in nationales Recht überführt und in den Ländergesetzen aufgegriffen. Mit der WHG Novellierung 2010 hat die WSV gemäß § 34 Abs. 3 WHG die Verantwortung für die Erhaltung und Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit an den von ihr errichteten oder betriebenen Stauanlagen der Bundeswasserstraßen übernommen.

An über 250 Stauanlagen in den Bundeswasserstraßen besteht Maßnahmenbedarf, d. h. es müssen Bauwerke zur Verbesserung der Durchgängigkeit neu errichtet oder in Stand gesetzt werden. Hierzu ist ein Ressourcenaufwand in der Größenordnung von derzeit geschätzten 1 Mrd. Euro erforderlich. Darüber hinaus bedarf es der Koordination von regional variierenden Bewirtschaftungsverantwortlichkeiten sowie der Berücksichtigung vielfältiger ökonomischer, ökologischer und politischer Anforderungen. Die zeitlichen Vorgaben der WRRL für die Zielerreichung sind knapp, da neben der Koordination verschiedener Interessen, die Planungsprozesse selbst langwierig sein können. Aus diesem Grund werden bei der Umsetzung der Maßnahmen verstärkt Synergien mit bereits geplanten Maßnahmen, wie z. B. ohnehin anstehenden Wehrinstandsetzungen, gesucht. Darüber hinaus existiert insbesondere für Fischaufstiegsanlagen an großen Gewässern ein großer Bedarf, Kenntnislücken bzgl. des Fischverhaltens in Relation zu Topografie, Geometrie und Hydraulik im Einstiegsbereich und innerhalb von Aufstiegsanlagen zeitnah zu schließen, um eine ausreichende Funktionsfähigkeit der neuen Anlagen gewährleisten zu können. Auf Ebene des Bundes bedarf es daher einer Umsetzungsstrategie, welche unterschiedliche ökologische und ökonomische Anforderungen berücksichtigen, politische und administrative Randbedingungen widerspiegeln und eine Basis für die Schließung von Kenntnislücken durch Forschungsprojekte bieten sollte.

Zusätzlich zu den Kenntnislücken erschwert die teils aufwändige und technisch anspruchsvolle Integration neuer Fischaufstiegsanlagen (FAA) in vorhandene Bausubstanzen eine fristgerechte Maßnahmenumsetzung und führt u. U. zu Konflikten mit anderen Nutzungen wie der Energieerzeugung. So muss beispielsweise bei vorhandener Wasserkraftnutzung die Auffindbarkeit einer FAA durch die Position des Einstiegs oder der Einstiege in unmittelbarer Nähe zu Turbinenausläufen gewährleistet werden, wodurch es bauzeitlich oder dauerhaft zu Einschränkungen bei der Energieerzeugung kommen kann.

Auf lokaler Ebene ist demzufolge die Entwicklung einer Strategie erforderlich, um – insbesondere in erheblich veränderten Wasserkörpern - eine Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit ohne eine signifi-

Schutz des Lebensraumes, Eingriffsminderung und Renaturierung

Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen
- eine Herausforderung in mehrfach genutzten Flüssen

kante Einschränkung unterschiedlicher Nutzungen zu erreichen. Hierzu sind u. a. Forschungsprojekte notwendig, die auf die Analyse der Interaktion Fischverhalten-Hydraulik zielen, z. B. um die Auffindbarkeit einer FAA bei gleichzeitiger Nutzung einer Stauanlage zur Energieerzeugung zu gewährleisten.

Im Folgenden werden derartige Strategien und Ansätze vorgestellt, die auf Ebene des Bundes als auch auf lokaler Ebene den Umgang mit der Herausforderung der Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit an vielfach genutzten Wasserstraßen aufzeigen.

2. Methoden

2.1 Ansätze auf Bundesebene: Entwicklung einer Umsetzungsstrategie

Die vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) aufgestellte Umsetzungsstrategie verfolgt das Ziel, eine ökologisch und ökonomisch effiziente Umsetzung der notwendigen Maßnahmen an den Bundeswasserstraßen innerhalb des engen Zeitrahmens der WRRL zu ermöglichen. Sie basiert auf sorgfältig zusammengestellten Informationen, einer engen Kooperation mit Betroffenen an den Wasserstraßen und folgt einem schrittweisen Vorgehen. Ein Schlüsselement ist das „Priorisierungskonzept für Maßnahmen zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit an Bundeswasserstraßen“, welches ein gemeinsames Produkt des Bundesverkehrsministeriums, der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung sowie der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ist.

In einem ersten Schritt stellte die BfG die fachlichen Hintergrundinformationen zusammen und identifizierte auf dieser Basis anhand von biologischen Kriterien eine standortspezifische Einstufung der ökologischen Dringlichkeit. Für alle Standorte in den Bundeswasserstraßen wurde die fischökologische Bedeutung und eine erste Abschätzung der aktuellen Durchgängigkeit anhand technischer Kriterien des DWA Merkblatts M 509 (DWA 2010), vorgenommen. Wurde ein Maßnahmenbedarf ermittelt, erfolgte die Einordnung der Dringlichkeit aufgrund von fischökologisch relevanten Kriterien und darunterliegenden Parametern anhand eines Klassifizierungsschemas. Hierzu wurden die Informationen der Bundesländer zu den ersten Bewirtschaftungsplänen nach WRRL (z. B. Hintergrunddokumente, Umweltziele, Angaben zu Referenzzönosen der Fische), die Aalbewirtschaftungspläne gemäß der EU-VO zum Aalschutz sowie Angaben der Bundesländer bzw. des Bundesamtes für Naturschutz zu Fischarten, die gemäß der europäischen Fauna-Flora-Habitatrichtlinie (FFH-RL) geschützt sind, herangezogen. Basierend auf diesen Informationen wurde zunächst für jede der über 250 Stauanlagen geprüft, ob diese in einem Wanderkorridor liegt. Die Einstufung einer fischökologischen Dringlichkeit von Maßnahmen erfolgte dann anhand differenzierter Kriterien für die potamodromen Fischarten (Arten die innerhalb der Flüsse wandern), die anadromen Fischarten (Arten der Laichgebiete im Süßwasser und Aufwuchsgebiet im marinen Lebensräumen (haben), sowie für die katadromen Fischarten (Arten deren Laichgebiete im marinen Bereich liegen, nur der Aal (siehe Tabelle 1).

Im Ergebnis wurde für jede einzelne Stauanlage eine Dringlichkeit zur Maßnahmenumsetzung aus fischökologischer Sicht abgeleitet. Hierbei wurde eine hohe Dringlichkeit empfohlen, wenn die Maßnahme der Sicherung und Entwicklung von Wanderfischbeständen mehrerer Arten in einem schlechten Erhaltungszustand dient bzw. Lebensräume mit sehr großem Potenzial für Wanderfische erschließt. Von geringer Dringlichkeit sind Maßnahmen, wenn sie der Erschließung potenziell geeigneter Lebensräume von Wanderfischen dienen, die erst durch die Passage einer größeren Anzahl von Querbauwerken erreichbar sind.

In einem zweiten Schritt leitete die WSV unter Berücksichtigung der biologischen Dringlichkeit, zeitlicher und rechtlicher Verbindlichkeiten sowie gegebener Synergien mit laufenden Erhaltungs- oder Instandsetzungsmaßnahmen an Wehren eine regionale Reihung von Durchgängigkeitsmaßnahmen ab. Um die erforderliche Effizienz und Wirkung der Maßnahmen im Einzugsgebietsmaßstab erzielen zu können, wurden auch die WRRL-Maßnahmenplanungen und Prioritätensetzungen der an vielen Zuflüssen der Bundeswasserstraßen zuständigen Bundesländerverwaltungen einbezogen. Diese regionalen Maßnahmenreihungen der WSV-Dienststellen bilden zudem die Basis für die weiteren Abstimmungen mit den Bundesländern zu den WRRL-Bewirtschaftungsplänen.

Die abschließende Priorisierung von Maßnahmen erfolgte durch das BMVI durch eine Verschneidung der regionalen Umsetzungskonzepte mit übergreifenden politischen und ökonomischen Randbedingungen. Unter Berücksichtigung der verfügbaren personellen und finanziellen Ressourcen und der Einschätzung der aktuellen Durchgängigkeit erfolgte eine Untergliederung der Standorte in zwei Gruppen: Die eine umfasst alle Standorte an denen ein Bedarf an Maßnahmen besteht, die andere die Standorte, an denen noch eine Evaluierung des Maßnahmenbedarfs durchgeführt wird. Die Umsetzung von Maßnahmen soll in drei Phasen „bis 2015“, „bis 2021“ und „nach 2021“ erfolgen, welche sich an den Bewirtschaftungszyklen nach WRRL orientieren (siehe Abbildung 1).

Innerhalb der ersten Umsetzungsphase wurden die Maßnahmen entsprechend planungsrelevanter Kriterien gruppiert: Die erste Gruppe umfasst fünf Pilotanlagen, an denen Forschungsvorhaben durchgeführt werden sollen, um anstehende und für die Planung relevante Wissenslücken zu schließen. Die anderen Gruppen grenzen sich aufgrund unterschiedlicher zeitlicher und rechtlicher Verbindlichkeiten, Synergiepotenzialen mit laufenden Maßnahmen bzw. durch unterschiedliche Träger der Vorhaben (z. B. Wasserkraftbetreiber) ab.

Schutz des Lebensraumes, Eingriffsminderung und Renaturierung
Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen
- eine Herausforderung in mehrfach genutzten Flüssen

Faktor mit fisch-ökologischer Bedeutung	1. Kriterium	2. Kriterium	Dringlichkeit von Maßnahmen
Querbauwerk ist in einem Wanderkorridor für potamodrome bzw. Diadrome Wanderfischarten lokalisiert	Wanderkorridor ist relevant für anadrome Wanderfische	Anzahl vorhandener anadromer Wanderfischarten, die in keinem guten Erhaltungszustand sind, ist größer 1 und deren Erhalt und Entwicklung entspricht den Schutzziele der WRRL (Art. 4) <i>oder</i> Potenziell gut geeignete Lebensräume sind potenziell sehr gut erreichbar (durch < 4 Querbauwerke von marinen Lebensräumen getrennt)	Hoch
		Anzahl vorhandener anadromer Wanderfischarten, die in keinem guten Erhaltungszustand sind, ist „1“ und deren Erhalt und Entwicklung entspricht den Schutzziele der WRRL (Art. 4). <i>oder</i> Potenziell gut geeignete Lebensräume sind potenziell gut erreichbar (durch < 6 Querbauwerke von marinen Lebensräumen getrennt)	Mittel
		Potenziell gut geeignete Lebensräume sind potenziell weniger gut erreichbar (durch > 6 Querbauwerke von marinen Lebensräumen getrennt)	Gering
	Wanderkorridor ist relevant für katadrome Aale, die nach der Europäischen Aalschutzverordnung geschützt sind	Anteil der Zielmenge (Biomasse in kg) abwandernder Blankaale in diesem Wanderkorridor ist größer 20 % der Gesamtzielmenge abwandernder Blankaale aus allen bundesdeutschen Binnengewässern	Hoch
		Anteil der Zielmenge (Biomasse in kg) abwandernder Blankaale in diesem Wanderkorridor ist größer 10 % bis < 20 % der Gesamtzielmenge abwandernder Blankaale aus allen bundesdeutschen Binnengewässern	Mittel
		Anteil der Zielmenge (Biomasse in kg) abwandernder Blankaale in diesem Wanderkorridor ist kleiner 10 % der Gesamtzielmenge abwandernder Blankaale aus allen bundesdeutschen Binnengewässern	Gering
	Wanderkorridor ist relevant für potamodrome Wanderfische relevant	Potenziell gut geeignete Lebensräume (Vorranggewässer) sind potenziell sehr gut erreichbar (durch 1 Querbauwerk von BWaStr. getrennt); <i>Und</i> potamodrome Arten > 15 % der Referenzzönose	Hoch
		Potenziell gut geeignete Lebensräume (Vorranggewässer) sind potenziell sehr gut erreichbar (durch 2 Querbauwerk von BWaStr. getrennt); <i>Und</i> potamodrome Arten > 15 % der Referenzzönose	Mittel
		Potenziell gut geeignete Lebensräume (Vorranggewässer) sind potenziell weniger gut erreichbar (durch > 2 Querbauwerk von BWaStr. getrennt);	Gering

Tabelle 1: Ökologische Faktoren und Kriterien zur Ableitung der fischökologischen Dringlichkeit von Maßnahmen in BWaStr.

Schutz des Lebensraumes, Eingriffsminderung und Renaturierung
Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen
- eine Herausforderung in mehrfach genutzten Flüssen

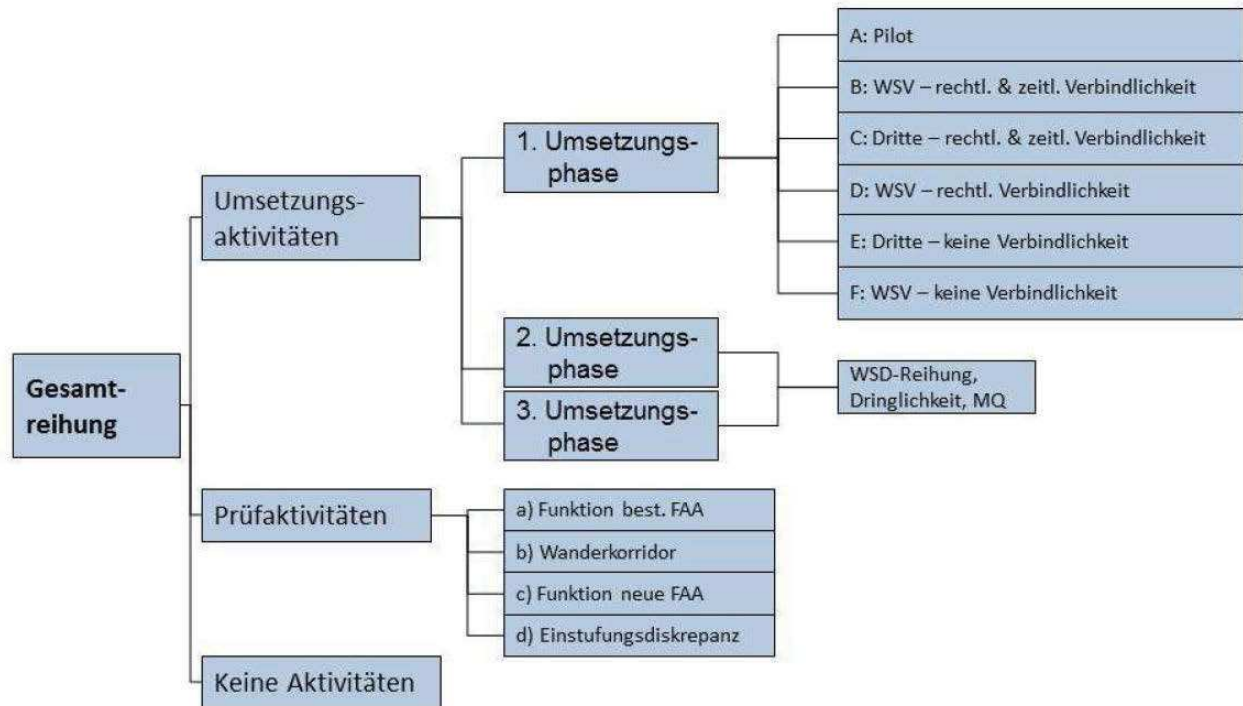


Abbildung 1: Schema zur Priorisierung von Maßnahmen zur Verbesserung der ökologischen Durchgängigkeit in Bundeswasserstraßen

2.2 Ansätze auf lokaler Ebene: Entwicklung einer Vorgehensweise zur Bemessung von Dotationswassermengen von FAA bei energetischer Nutzung einer Stauanlage

Insbesondere für anadrome Wanderfische, jedoch auch für viele weitere Fischarten ist die große Bedeutung der Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen ohne Zeitverlust zwischen Experten und in der Literatur unumstritten. Trotzdem wird die Bedeutung und Charakterisierung einer effektiven Leitströmung kontrovers diskutiert. Die deutsche Praxis an den Bundeswasserstraßen richtet sich zurzeit nach den Anforderungen des DWA-Merkblatts M509 (DWA 2010). Hier wird davon ausgegangen, dass eine definierte Leitströmung eine der wichtigsten Voraussetzungen für eine gute Auffindbarkeit einer Fischaufstiegsanlage ist, neben der Positionierung und dem Design der Einstiege. In der praktischen Anwendung sind beide Aspekte – Einstiegsgestaltung und Dotationswassermenge wegen ihrer Kostenrelevanz von entscheidender Bedeutung sowohl für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung als auch für die Wasserkraftbetreiber. Im Folgenden wird eine Vorgehensweise vorgestellt, die auf lokaler Ebene eine Bemessung der Dotationswassermenge zum Betrieb der Fischaufstiegsanlage unter Berücksichtigung vorhandener energetischer Nutzung der Stauanlage ableitet. Um die hydraulischen Bedingungen im Unterwasser eines Querbauwerks zu analysieren und hinsichtlich der Auffindbarkeit einer Fischaufstiegsanlage bewerten zu können, nutzen BAW und BfG einen Ansatz, der hydraulische Bedingungen mit biologischen Kriterien verschneidet. Basis dieses Ansatzes ist die Annahme, dass ein durchgehender Wanderkorridor vom Unterwasser bis in den Eingang in die FAA vorhanden ist. Dieser Wanderkorridor sollte die fischökologischen Anforderungen an hydraulische Parameter wie der Fließgeschwindigkeit erfüllen, die sich wiederum aus

der Schwimmfähigkeit der relevanten Fischarten ableiten (DWA 2010 resp. Adam & Lehmann 2011).

Die Schwimmfähigkeit eines Fisches, z. B. ausgedrückt als relative Schwimmgeschwindigkeit (Total- bzw. Körperlängen pro Sekunde), ist artspezifisch (Wardle 1975). Es werden hierbei grundsätzlich unterschiedliche Schwimmmodi unterschieden (Beamish, 1978; Pavlov, 1989): Die Sprintgeschwindigkeit erreichen Fische unter Aktivierung sowohl der roten als auch der weißen Muskulatur. Diese dient z. B. dazu, der Attacke eines Räubers zu entweichen oder Engstellen mit einer hohen hydraulischen Belastung zu passieren. Die gesteigerte Geschwindigkeit ermöglicht es Fischen zügig größere Strecken mit einer deutlichen hydraulischen Belastung zu passieren, z. B. bei der Laichwanderung oder der Passage einer Fischaufstiegsanlage. Die sogenannte Ausdauer- oder Dauergeschwindigkeit liegt in einem niedrigen Bereich und ermöglicht lang andauernde Fischbewegungen in Bereichen mit niedrigen hydraulischen Belastungen. Angaben zur Dauer und Geschwindigkeitsschwelle der einzelnen Schwimmmodi sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Um die hydraulischen Bedingungen im Unterwasser von Kraftwerken mit der oben und in Abbildung 3 dargestellten Methode zu evaluieren, sind hoch aufgelöste hydraulische Daten (z. B. Fließgeschwindigkeiten und Geschwindigkeitsvektoren) notwendig. Solche Daten werden an der Bundesanstalt für Wasserbau durch den Einsatz physikalischer und numerischer Modelle, die anhand von Naturmessungen kalibriert wurden, gewonnen. Basierend auf diesen Daten können für verschiedene Planungsvarianten hydraulische Karten generiert werden, die aufgrund der fischökologischen Anforderungen zur Schwimmgeschwindigkeit vergleichbar und bewertbar sind.

Schutz des Lebensraumes, Eingriffsminderung und Renaturierung
Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen
- eine Herausforderung in mehrfach genutzten Flüssen

Schwimmmodus	Dauer	Schwelle der Geschwindigkeit	Schema des Farbverlaufs (vgl. Abb. 3)
Max. Sprintgeschwindigkeit	≤ 20 sec	10 * TL/s 15 – 20 TL/s (für kleine Fische)	Rottöne
Gesteigerte Geschwindigkeit	> 20 sec; < 200 min	5* TL/s	Gelbtöne
Max. Dauergeschwindigkeit	> 200 min	2* TL/s	Grüntöne

Tabelle 2: Schwimmkapazitäten von Fischen basierend auf DWA (2010) resp. Bainbridge (1960); Graustufen nach Adam & Lehmann (2011) zur Erläuterung von Abbildung 3 (TL = Totallänge der Fische)

3. Ergebnisse

3.1 Bundesweite Reihung und Priorisierung von Maßnahmen

Auf Basis des BfG-Berichts 1697 zur Bewertung der ökologischen Dringlichkeit (BfG 2010) konnte für 68 Standorte eine hohe, für 60 Standorte eine mittlere und für 70 Standorte eine geringe ökologische Dringlichkeit identifiziert werden. Insbesondere für mündungsnah Standorte ist eine zeitnahe Realisierung der Maßnahmen erforderlich, um bestehende aber bedrohte Populationen von diadromen Arten (z. B. Atlantischer Lachs, Fluss- und Meerneunauge, Meerforelle) zu stützen und zu entwickeln. Aber auch Standorte unterhalb von Zuflüssen kommt eine große Bedeutung zu, um die Wanderungen potamodromer Arten (z.B. Barbe, Nase oder Quappe) in die Laich- und Nahrungshabitate in den Zuflüssen zu ermöglichen (Abb. 2).

Für mehr als 50 der insgesamt ca. 250 Standorte wird der Maßnahmenbedarf derzeit noch ermittelt. Die meisten dieser Standorte verfügen bereits über eine Fischaufstiegsanlage, die während der letzten 15 Jahre gebaut worden ist. Diese werden derzeit anhand des aktuellen Stands der Technik evaluiert und der Maßnahmenbedarf in Abstimmung mit der WSV und den Bundesländern ermittelt. An ca. 20 Standorten ist die Bedeutung als Wanderkorridor für Wanderfische unklar, da z. B. an diesen Standorten Einzugsgebiete vernetzt werden können.

Insgesamt konnten in den letzten drei Jahren 7 Fischaufstiegsanlagen in Bundeswasserstraßen fertig gestellt werden. Für die restlichen Stauanlagen, für die ein Maßnahmenbedarf festgestellt werden konnte, erfolgte durch das BMVI entsprechend dem oben genannten Vorgehen (siehe Abbildung 1) eine Einstufung in eine von drei Umsetzungsphasen, die sich zeitlich an den Bewirtschaftungsplänen nach WRRL orientieren. Konkret soll an ca. 45 Standorten während der ersten Umsetzungsphase mit dem Bau begonnen werden. Davon

sind fünf Pilotstandorte, die mit einer besonders hohen Priorität versehen wurden, um zeitnah offene Fragen für die Bemessung und den Betrieb von Fischaufstiegsanlagen zu klären und für nachfolgende Projekte nutzbar zu machen.

Andere Maßnahmen werden derzeit durch die Betreiber von Wasserkraftanlagen vorangetrieben, um dadurch in den Genuss der Vergütung gemäß dem Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG) zu kommen.

Die Umsetzung für die meisten Maßnahmen ist für die zweite (62 Anlagen) bzw. dritte Umsetzungsphase (75 Anlagen) vorgesehen, wobei diese Anzahl gemäß des derzeit laufenden Evaluierungs- und Fortschreibungsprozess auch höher ausfallen kann.

3.2 Bemessung der Dotationswassermenge für Fischaufstiegsanlagen an Stauanlagen mit energetischer Nutzung

Auf Basis der in Abschnitt 2.2. dargelegten Methodik, wurden an zwei Standorten am Neckar (Lauffen und Kochendorf) verschiedene Planungsvarianten anhand physikalischer und numerischer Modelluntersuchungen miteinander verglichen. Basierend auf ökohydraulischen Kriterien wie i) Herstellung einer kontinuierlichen Verbindung hydraulisch potenziell geeigneter Wanderkorridore zwischen dem Unterwasser und der Fischaufstiegsanlage und ii) Fließgeschwindigkeiten, die in diesen Bereichen selbst für schwimmschwache Arten eine aufwärtsgerichtete Wanderung in einem geeigneten Schwimmmodus erlauben, wurden unterschiedlichen Szenarien analysiert.

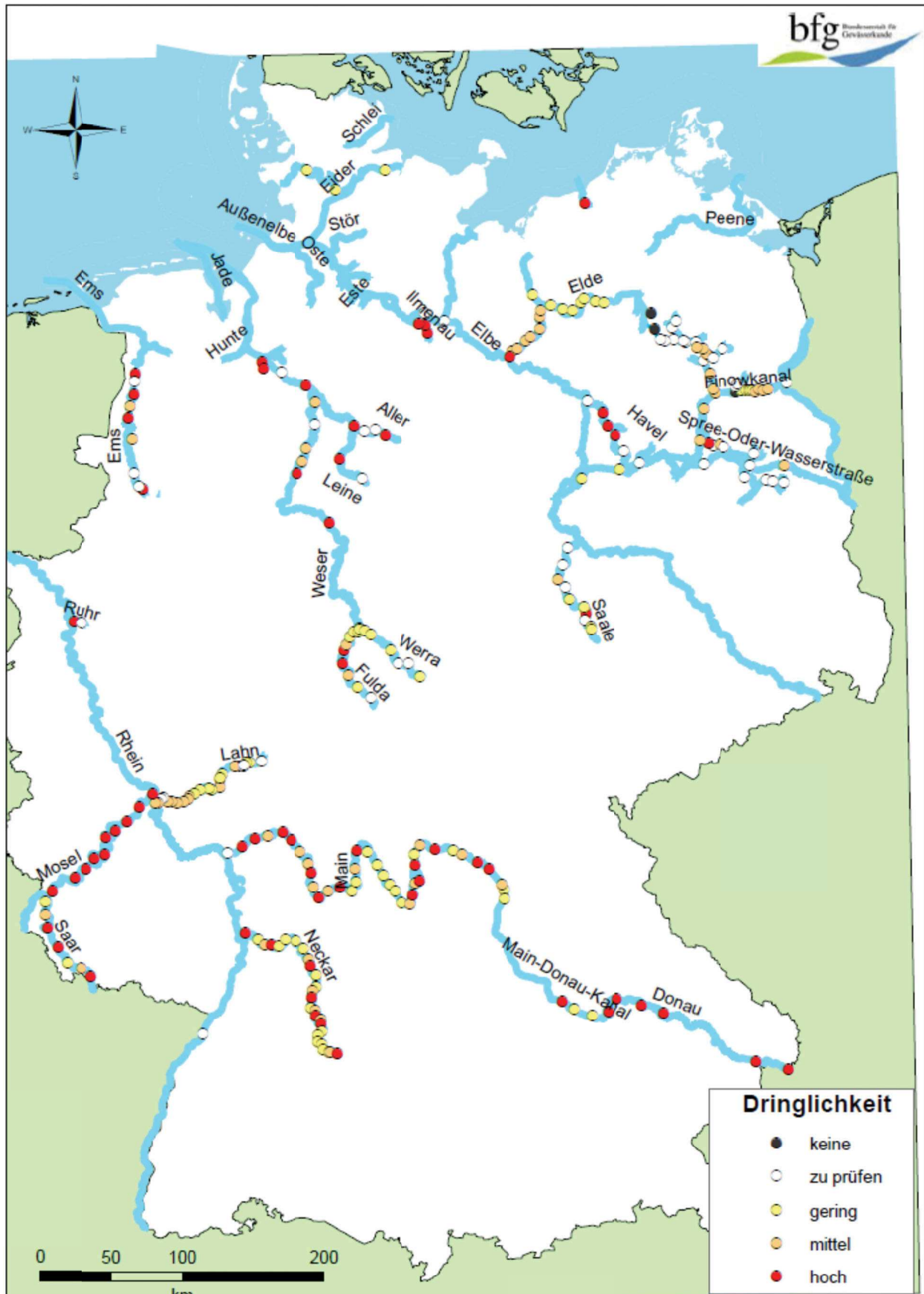
Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich geeignete ökohydraulische Bedingungen bei mittleren Fließgeschwindigkeiten am Einstieg der FAA ausbilden, die größer sind als empfohlene Wert im DWA-Merkblatt von 1 m/s. Um diese Ergebnisse auf Standorte mit vergleichbaren hydraulischen Bedingungen zu transferieren, ist das erforderliche Wasser für die Dotationswassermenge im Verhältnis zu einer konkurrierenden Strömung zu sehen (Larinier 2002), wobei die Charakteristik der konkurrierenden Strömung in der Literatur nicht näher definiert ist. Die bisherigen Ergebnisse der Modelluntersuchungen an den Pilotanlagen erlauben die Herstellung eines Bezuges zwischen der erforderlichen Dotationswassermenge und der konkurrierenden Strömung, mit dem Ziel diese Erkenntnisse auch auf andere Standorte übertragen zu können. Hierbei ist herauszustellen, dass für jeden neuen Standort zu prüfen ist, inwieweit die erarbeiteten Ergebnisse der Pilotanlagen für diesen neuen Standort anwendbar sind oder ob zusätzliche Untersuchungen erforderlich sind.

4. Schlussfolgerungen

Die Erfahrung zeigt, dass den Erfordernissen der WRRL hinsichtlich der Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit an den Bundeswasserstraßen nur durch den Einsatz innovativer Technologien, transparenter und sorgfältiger Planungen und in Kooperation mit den Interessenvertretern an jedem einzelnen Standort entsprochen werden kann.

Ein schrittweises Herangehen und sorgfältige Maßnahmenplanungen erweisen sich dabei als essentielle Elemente der Umsetzungsstrategie. Die Maßnahmenpriorisierung des BMVI stellt den notwendigen Handlungsrahmen für die mit der Aufgabenumsetzung betrauten WSV dar. Durch die schrittweise Umsetzung können Erfahrungen aus der Umsetzung sowie neue wissenschaftliche Erkenntnisse der BAW und BfG laufend in den Planungs- und Umsetzungsprozess eingebunden werden.

Schutz des Lebensraumes, Eingriffsminderung und Renaturierung
 Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen
 - eine Herausforderung in mehrfach genutzten Flüssen



Bundesanstalt für Gewässerkunde - Referat U4 - Tierökologie
 Am Mainzer Tor 1 - 56068 Koblenz

Kartengrundlage: DBWK 1000
 Stand 08/2010

Abbildung 2: Einstufung der fischökologischen Dringlichkeit von Maßnahmen zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit (Fischaufstieg) gemäß BfG- Bericht 1697 (BfG, 2010)

Schutz des Lebensraumes, Eingriffsminderung und Renaturierung

Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen - eine Herausforderung in mehrfach genutzten Flüssen

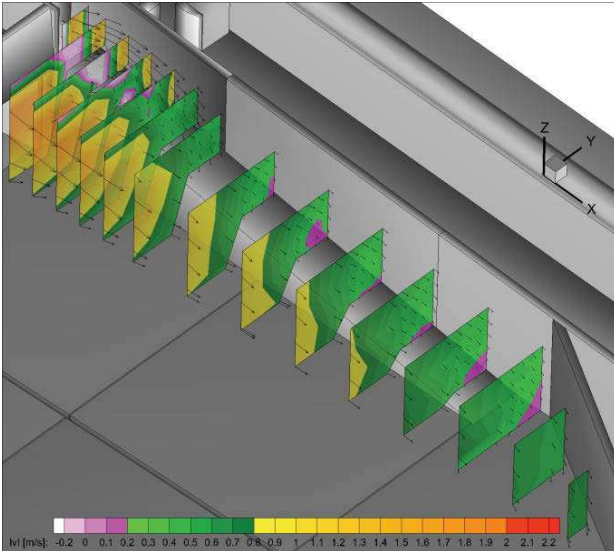


Abbildung 3: Modellergebnisse zur Ausbildung von Fließgeschwindigkeiten im Unterwasser des Kraftwerks Lauffen am Neckar zur Abschätzung der notwendigen Leitströmung aus dem Einstieg der FAA. Die Farbskala orientiert sich für das dargestellte Beispiel an den Schwimmmodi eines 40 cm langen potamodromen Wanderfisches (z.B. Barbe/Nase)

Zusätzlich wird deutlich, dass für die erfolgreiche Maßnahmenumsetzung ein dynamisches und flexibles Netzwerk an Bundes-, Landes- und lokalen Behörden, Energieerzeugern, wissenschaftlichen Instituten und Interessenverbänden notwendig ist. Die Zusammenarbeit aller Beteiligten und Betroffenen ist notwendig, um die Umweltziele innerhalb der Fristen der WRRL zu erreichen. So dringend der Maßnahmenbedarf an vielen Standorten in den Bundeswasserstraßen auch ist, es ist nicht möglich, allen Herausforderungen gleichzeitig gerecht zu werden. Eine Reihe von Zwängen und Unsicherheiten wie z. B. lang andauernde Planverfahren und unerwartete Abstimmungshindernisse vor Ort oder auch mangelnde personelle Ressourcen haben zu Verzögerungen im Planungsprozess geführt und gefährden die gemäß Priorisierungskonzept vorgesehene zeitliche Umsetzung.

Stetig wächst das Wissen über die Art und Weise, funktionsfähige Fischaufstiegsanlagen zu bauen. Trotzdem gibt es weiterhin Erkenntnislücken, die für eine ökologisch und ökonomisch effiziente Umsetzung von Maßnahmen dringend zu füllen sind. Es wird deutlich, dass weitere Forschungsaktivitäten notwendig sind und einen transregionalen interdisziplinären Austausch unabdingbar machen.

Gleichwohl zeigen erste Maßnahmen erfreuliche Ergebnisse. So konnten in der neuen FAA Koblenz an der Mündung der Mosel in den Rhein Erstnachweise aufsteigender Maifische seit über 60 Jahren sowie aufsteigender Meerneunaugen und Quappen seit fast ebenso langer Zeit erbracht werden. Größere Aufstiegszahlen auch der potamodromen Arten verdeutlichen auch für diese Fische die hohe Bedeutung einer Verbindung von Lebensräumen und zeigen, dass von diesen Maßnahmen nicht nur die Populationen in den Bundeswasserstraßen sondern auch in den Zuflüssen profitieren.

Literatur

- ADAM, B.; LEHMANN, B. „Ethohydraulik“, 1st edition, Springer Verlag Heidelberg, (2013).
- BAINBRIDGE R. (1960): Speed and stamina in three fish. *Journal of Experimental Biology* 37: 129–153.
- BEAMISH, F.W.H. (1978): Swimming capacity. - In: Hoar, W.S.; Randall, D.J. (ed): *Fish Physiology*, Vol. 7, Academic Press, London, 101–187.
- BERTOLDI W, GURNELL A, SURIAN N, TOCKNER K, ZANONI L, ZILIANI L, ZOLEZZI G. (2009): Understanding reference processes: linkages between river flows, sediment dynamics and vegetated landforms along the Tagliamento River, Italy. *River Research and Applications* 25: 501–516.
- BFG (FEDERAL INSTITUTE OF HYDROLOGY) (2010): "Restoration of river continuity at the barrage systems of the Federal Water Ways – Assessment of fish ecological urgency of measures for upstream migration. Koblenz, BfG – Report 1697 (in German).
- BMU (FEDERAL MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, NATURE CONSERVATION AND NUCLEAR SAFETY) (ed.) (2010): *Water Framework Directive – The way towards healthy waters*.
- BMVBS (FEDERAL MINISTRY OF TRANSPORT, BUILDING AN URBAN DEVELOPMENT (ED.)) (2013): *Diversity on federal waterways – Examples of environmentally sustainable development*.
- DWA (DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSER UND ABFALL) 2010: „Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung“, Merkblatt M 509, Entwurf, Hennef.
- LARINIER, M. (2002): Location of fishways. In: Larinier, M. et al.: *Fishways: biological basis, design criteria and monitoring*. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 364 suppl., pp. 39-53.
- LUCAS MC, BARAS E, THOM TJ, DUNCAN A, SLAVIK O. (2001): *Migration of Freshwater Fishes*. Blackwell, Sciences: Oxford.
- PAVLOV, D. S. (1989): Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: USSR. In: *FAO Fisheries Technical Paper* 308, pp. 1-97.
- THORP J.H., THOMS M., DELONG M.D. (2006): The riverine ecosystem synthesis: biocomplexity in river networks across space and time. *River Research and Applications* 22: 123–147.
- WARD, J.V.; TOCKNER, K.; ARSCOTT, D.B.; CLARRET, C. (2002): Riverine landscape diversity. – *Freshwater Biology* 47, 517-540.
- WARDLE, C. S. (1975). Limit of fish swimming speed. *Nature*, 255(5511), 725-727.
- WOHL E, ANGERMEIER P.L., BLEDSOE B., KONDOLF G.M., MACDONNELL L., MERRITT D.M., PALMER M.A., POFF N.L., TARBOTON D. (2005): *River restoration*. *Water Resources Research* 41: W10301.
- UNITED NATIONS (2005): *Millenium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-being. A framework for assessment*. Island press, Washington

Schutz des Lebensraumes, Eingriffsminderung und Renaturierung
Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen
- eine Herausforderung in mehrfach genutzten Flüssen

Verfasser

Dr. Matthias Scholten

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Referat U4 - Ökologische Durchgängigkeit
Am Mainzer Tor 1,
56068 Koblenz
Tel.: 0261/1306-5937
E-Mail: scholten@bafg.de

Dipl.-Biol. Christian von Landwüst

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Referat U4 - Ökologische Durchgängigkeit
Am Mainzer Tor 1,
56068 Koblenz
Tel.: 0261/1306-5372
E-Mail: landwuest@bafg.de

Dr. Roman Weichert

Bundesanstalt für Wasserbau
Referat W1 - Binnen
Kußmaulstr. 17,
76187 Karlsruhe
Tel: 0721/9726-2660
E-Mail: roman.weichert@baw.de

Prof. Dr. Jochen Koop

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Referat U4 - Ökologische Durchgängigkeit
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/1306-5404
E-Mail: koop@bafg.de

Dr. Dorothe Herpertz

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Referat WS 14 - Klima, Umweltschutz, Gewässerkunde,
BfG
Robert-Schuman-Platz 1,
53175 Bonn
Tel.: 0228/300-4243
E-Mail: dorothe.herpertz@bmvi.de

Praxisorientierte Forschung im Elbeästuar – Gelegenheiten zur Förderung von WwN

Dipl.-Geograph Uwe Schröder,
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Dr. Carolin Schmidt-Wygasch,
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Dipl.-Geoökologin Maike Heuner,
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Dr. Elmar Fuchs,
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Zusammenfassung

Die Tideelbe ist das mehr als 100 km lange verbindende nautische Element des Hamburger Hafens mit der Welt in Übersee. Im Nachgang der vergangenen Anpassung der Fahrrinne an die Containerschifffahrt in 1999/2000 wurden verschiedene wissenschaftliche Untersuchungen zur Vegetation, Boden und Sediment der Ufer durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen können als wertvolle Bausteine zur Umsetzung der Planungsschritte des PIANC *Working with Nature* (WwN) Ansatzes dienen, da insbesondere Lücken im Systemverständnis der Ästuarie bestehen, die die Nutzung der natürlichen Prozesse beeinträchtigen. Das bessere Verständnis der Funktionen und Prozesse der tidebeeinflussten Uferzonen ist Kern der hier betrachteten Forschungen. Eine neue Umweltgesetzgebung hat dazu geführt, dass die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) bezüglich der Unterhaltung der Wasserstraßen und der Uferzonen neue Wege beschreiten muss. Mittlerweile ist es gesellschaftlicher Standard, dass schifffahrtsgebundene Projekte nicht nur die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt berücksichtigen sondern auch die Belange der Natur.

1. Einleitung – Projektbedarf und Ziele formulieren) (Establish Project Need and Objectives

Seit mehreren Jahrhunderten werden die Mündungen großer Flüsse und ihre angrenzenden Marschen für Siedlungen, Landwirtschaft und Handel beansprucht (Temmerman et al. 2013). Deiche zum Schutz und zur Entwicklung dieser Gebiete wurden gebaut, Ufer befestigt und die Flüsse begradigt und vertieft; so auch die Tideelbe. Heute ist dieser Flussabschnitt im Norden Deutschlands einer der meist befahrenen Schifffahrtsstraßen und der Hamburger Hafen ist einer der größten Überseehäfen in Europa. Die Marschen an der Tideelbe werden intensiv durch die Landwirtschaft genutzt. Diese enorme ökonomische Bedeutung bedingt ein intensives Management der Tideelbe als Wasserstraße, um den Herausforderungen von Heute und in Zukunft gewachsen zu sein. Technische Befestigungen von Ufern sind ein Aspekt, um die Wasserstraße zu sichern. An der Tideelbe ist dies auch in großem Stil passiert, 60% der Uferabschnitte zwischen Geesthacht und Cuxhaven sind gesichert. Gleichzeitig sind an der Tideelbe Uferbereiche erhalten geblieben, die eine naturnahe Vegetationszonierung aufweisen und von hohem ökologischem Wert sind. Diese Bedeutung für die Umwelt wird sichtbar durch die Unterschätzung großer Anteile der Uferbereiche auf Grundlage nationaler und europäischer Gesetzgebungen und Richtlinien. Diese Gebiete

geraten weiterhin unter Druck durch anthropogen verursachte Veränderungen, ausgelöst zum Beispiel durch die Vertiefung der Fahrrinne. Bislang folgten Ausbaumaßnahmen der Eingriffsregelung mit Vermeidung und Kompensation möglicher Umweltauswirkungen. Möglichkeiten zur Flächenkompensation sind bereits begrenzt und die Gefahr wächst, dass in naher Zukunft die natürlichen Leistungen der betroffenen Ökosysteme für immer verloren gehen. Im Einklang mit der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) (Europäische Kommission 2000) und dem Wasserhaushaltsgesetzes (WHG 2009) ist die WSV mittlerweile gehalten, nicht nur die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt zu gewährleisten sondern auch die Erreichung eines guten ökologischen Zustands der Gewässer und ihrer Ufer zu fördern. Diese Kombination von ökologischen und schifffahrts-technischen Aufgaben ist für die WSV eine neue Herausforderung. Ein neues Denken ist dafür erforderlich; es muss mehr gemanagt denn kontrolliert werden. Die PIANC *Working with Nature* Philosophie (WwN) wurde von ihrer Umwelt Kommission EnviCom 2008 erarbeitet und ist jetzt fester Bestandteil des allgemeinen PIANC Auftrages und Zielsetzung (PIANC 2008). WwN versucht einen Wandel im Planungs- und Umsetzungsprozess von Wasserstraßen- und Hafeninfrastrukturmaßnahmen einzuleiten. WwN empfiehlt bereits in frühesten Planungsphasen Natur und Technik zu berücksichtigen: *Establish Project Needs and Objectives* (Projektbedarf und Ziele formulieren), *Understand the Environment* (Umwelt und Natur verstehen), *Make Meaningful Use of Stakeholder Engagement and Identify Win-Win Options* (Betroffene Interessenvertreter einbeziehen und Win-Win-Situationen identifizieren), *Prepare Project Design to Benefit Navigation and Nature* (Projektplanung und -umsetzung ausarbeiten zum gemeinsamen Nutzen von Schifffahrt, Umwelt und Natur). Gleichwohl ist es offensichtlich, dass es für die Umsetzung des Konzepts erhebliche Wissenslücken und somit Forschungsbedarf hinsichtlich der Schritte Naturverständnis und Nutzbarmachung natürlicher Prozesse existiert. Dies trifft auch für Maßnahmen an der Tideelbe zu. Das Sedimentmanagementkonzept für die Tideelbe und die zukünftige Gestaltung der Ufer sind prominente Beispiele. Für letztgenanntes, den Rückbau von verbauten zu naturnahen Ufern, besteht Forschungsbedarf zu Fragen der hydro-morphologischen Prozesse (z. B. die hydromechanische Belastung der Ufer durch schiffsinduzierte Wellen) und der Ausgestaltung und Charakteristik von Ufervegetation und Böden. Folgerichtig ist eine interdisziplinäre Forschung nötig, die naturwissenschaftliche und technische Fragestellungen mit sozio-ökonomischen verbindet.

2. Veränderungen der Röhrlichzonen – Umwelt und Natur verstehen (Understand the Environment)

Zur Sicherstellung der Containerschifffahrt zum Hamburger Hafen wurde die Fahrrinne der Tideelbe mehrfach ausgebaut. Solche Maßnahmen führten zu Veränderungen der Tidekennwerte (z. B. der Erhöhung des Mittleren Tidehochwassers). Aufgrund dessen wurde neben anderen Auswirkungen auch ein starker Verlust der Tide-Röhrliche in Folge der vergangenen Fahrrinnenanpassung 1999/2000 prognostiziert (PÖUN 1997). Zur Beweissicherung der tatsächlichen Veränderungen der ufernahen Vegetation und zur Erlangung eines

besseren Systemverständnisses der Tideelbe wurde ein Langzeit-Monitoring aufgesetzt (Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord 1999, Schröder 2004a). Dies war ein erster signifikanter Schritt für die Verbesserung des Verständnisses der Prozesszusammenhänge im System Fluss und Ufer.

2.1 Monitoring

Zur hochgenauen Ableitung der tatsächlichen Ausdehnung und der Veränderungen der ufernahen Vegetationseinheiten wurde ein auf hochauflösenden multispektralen Luftbilddaten aufbauender Klassifikationsalgorithmus entwickelt (Ehlers et al. 2000, Gähler et al. 2002). Bis zum heutigen Zeitpunkt wurde die Vegetation an der Tideelbe in vier Kampagnen erfasst (2000/2001, 2002, 2006 und 2010) und ein raumzeitliches Modell der Entwicklung der Ufervegetation aufgebaut.

Zusätzlich wurden historische Luftbilddaten analysiert und interpretiert, um auch die vergangene Entwicklung der Ufervegetation zu erfassen (Schröder 2004b) (siehe Abbildung 1).

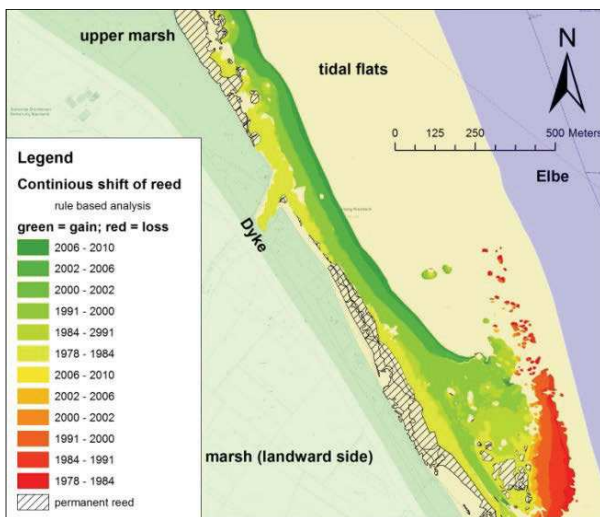


Abbildung 1: Ausschnitt einer Darstellung des raumzeitlichen Modells zur Entwicklung von Tide-Röhrichten (Analysen historischer Luftbilddaten und rezenter Fernerkundungsdaten von 1978 bis 2010)

Entgegen der Annahme, dass es zu massiven Verlusten der Tide-Röhrichte in Folge der Fahrrinnenanpassung von 1999/2000 kommen sollte, sind diese nicht, weder in historischer Zeit noch aktuell, in weiten Gebieten der Tideelbe zurückgegangen. Sowohl Zuwächse als auch Verluste wurden detektiert, teilweise in nächster Nachbarschaft (siehe Abbildung 1). Die Tideparameter sind nicht so sehr wie ursprünglich angenommen allein für Veränderungen in der Ausdehnung der Tide-Röhrichte verantwortlich. Das Zusammenspiel von Erosion und Sedimentation, also morphodynamische Prozesse, scheinen die Haupttreiber von Veränderungen zu sein (Schröder 2004b). Die ufernahe Verbringerung von Baggern und die Verkürzung von Deichlinien haben in den letzten 50 Jahren neue Ufer und Inseln geschaffen. Aufgrund ihres relativ jungen Alters

sind diese Abschnitte in Teilbereichen bis heute besonders dynamische Ufer (Schröder 2004a). Die Verringerung der Fließgeschwindigkeiten in den Seitenarmen führt zu stärkerer Sedimentation und somit zur weiteren Ausbreitung der Tide-Röhrichte. Dementgegen nahm die Belastung durch Schiffswellen mit jeder Generation neuer Frachtschiffe zu, so dass es zu offensichtlichen Beeinträchtigungen der nah zur Fahrrinne siedelnden Ufervegetation kam. Aus den diesen Zusammenhängen zugrunde liegenden Prozessen und ihre Bemessung leitet sich weiterer Forschungsbedarf ab.

2.2 Entwicklung von Lebensraumeignungsmodellen

Aufbauend auf den Monitoringdaten und ergänzenden Felddaten wurden Lebensraumeignungsmodelle für die Ufervegetation entwickelt (Heuner 2006). Mittels dieser Modelle können Veränderungen in der Ausdehnung der betrachteten Vegetationseinheiten im Falle von Veränderungen der Topographie oder der Tidekennwerte prognostiziert werden. Die GIS-generierten Parameter „Relative Höhe zum Mittleren Tidehochwasser“ und „Distanz zur Fahrrinnenachse“ als Proxy für schiffsinduzierte Wellenbelastungen konnten als Einflussvariablen für die Antwortvariablen (Habitate) „Watt“ und die landeinwärts folgenden Vegetationseinheiten der „Pionier-Röhrichte“ (z. B. dominiert von der Strandsimse), der „Schilfröhrichte“ und den „Gebüsch und Bäumen“ bestätigt werden (Fuchs et al. 2013).

Diese Modelle konnten zur Vorhersage der räumlichen Entwicklung der von Tide-Röhrichten in Folge von Ausbaumaßnahmen der Fahrrinne oder des Klimawandels genutzt werden. Im KLIWAS 3.09-Projekt – ein Projekt des Klimafolgenforschungsprogramms des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur – wurde mit diesen Modellen der Einfluss des Meeresspiegelanstiegs in Zeiten des Klimawandels auf die Ufervegetation untersucht. Zusätzlich wurden in diesem Projekt 1:1 Laborversuche aufgesetzt, in denen der Einfluss von Wellen auf einige Arten der Pionier-Röhrichte untersucht wurde. Erste Ergebnisse zeigen Unterschiede zwischen den Arten in der an den Halmen wirkenden Zugkraft und im Vermögen, Wellenenergie zu dämpfen (Heuner 2013).

Eine weitere Möglichkeit diese Modelle zu nutzen ist, das Entwicklungspotenzial von Röhrichten in unterschiedlichen vorgeplanten Ufergestaltungsoptionen für einen optimierten Rückbau eines technisch gesicherten Ufers zu prognostizieren.

3. Ufersicherung in Zeiten des Wandels – Betroffene Interessensvertreter einbeziehen und Win-Win Situationen identifizieren (*Make Meaningful Use of Stakeholder Engagement and Identify Win-Win Options*)

Der Globale Wandel förderte ein stärkeres gesellschaftliches Bewusstsein bezüglich der Ökologie und ihres gesellschaftlichen und ökonomischen Wertes. Der Verlust ökosystemarer Funktionen und Leistungen durch die bisherige Unterhaltung und Ausbau von Wasserstraßen hatte ein neues interdisziplinäres Denken zur Folge.

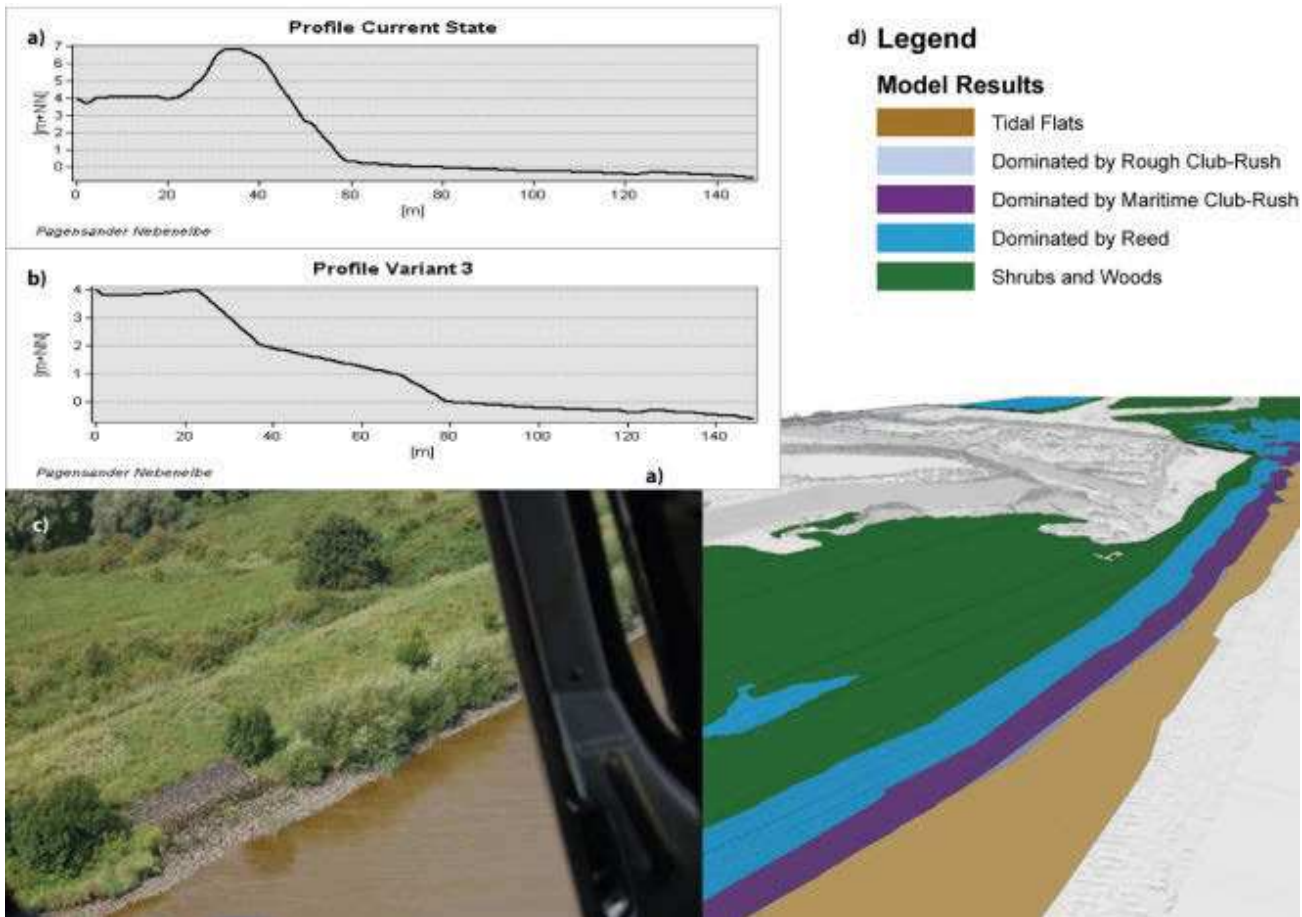


Abbildung 2: Beispiel einer Anwendung des Habitateignungsmodells zur Entscheidungshilfe bei Rückbaumaßnahmen technisch gesicherter Ufer; a) Uferprofil des Ist-Zustands, b) Profilvariante eines rückgebauten Ufers, c) Luftaufnahme des Ufers, d) Ergebnis der Modellanwendung auf die gewählte Variante

Der Rückgang naturnaher Lebensräume und der begrenzte Raum an Kompensationsmöglichkeiten führten zu einer mehr die Nachhaltigkeit fokussierende Umweltgesetzgebung. Die Einführung der WRRL (Europäische Kommission 2000) und in Folge dessen die Verabschiedung des überarbeiteten Wasserhaushaltsgesetzes (WHG 2009) haben die Aufgaben der WSV dahingehend erweitert, dass nicht allein die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt im Fokus zu stehen hat sondern auch ein verantwortlicher Umgang mit den natürlichen Ressourcen der Gewässer und Ufer.

Über 60 Prozent der Ufer der Tideelbe zwischen dem Wehr bei Geesthacht und Cuxhaven sind technisch gesichert. Sie unterliegen stark veränderten hydro-morphologischen Bedingungen und weisen nur verarmte Ausprägungen einer typischen Ästuar-Vegetation auf. In Übereinstimmung mit den Zielen der WRRL, ein gutes ökologisches Potential des erheblich veränderten Wasserkörpers der Tideelbe zu erreichen, sind auch die regionalen integrierten Bewirtschaftungspläne u. a. darauf ausgelegt technisch gesicherte Ufer in naturnähere und strukturreichere Übergangsräume zu verwandeln. Die Integration der Ziele von Schifffahrt, Naturschutz, Landwirtschaft oder Naherholung und das Auffinden gemeinsamer Lösungen führt zu Win-Win-Situationen für alle betroffenen Interessensgruppen.

4. Das interdisziplinäre Forschungsprojekt „ElbService“ – Projektplanung und -umsetzung ausarbeiten zum gemeinsamen Nutzen von Schifffahrt, Umwelt und Natur (*Prepare Project Proposal/Design to Benefit Navigation and Nature*)

Die Herausforderung bei der Kombination von schiffahrtlichen Anforderungen mit ökologischen Belangen bei Unterhaltung- und Ausbau von Wasserstraßen ist, den Vorteil bei naturerhaltenden oder fördernden Maßnahmen auch ökonomisch zu fassen und den rein schiffahrtsgebundenen Betrachtungen also fiskalisch gegenüber zustellen. Zur ökonomischen Bewertung ökosystemarer Leistungen bietet sich das Konzept der *Ecosystem Services*, der Ökosystemleistungen, an (TEEB 2010).

In diesem Kontext wurde das Forschungsprojekt ElbService, gefördert vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ins Leben gerufen. Es ist im Programm zur wasserwirtschaftlichen Unterhaltung eingebettet. In ElbService werden Grundlagen für das Verständnis der Uferstabilität und ihrer natürlichen Prozesse sowie der ableitbaren Ökosystemleistungen erarbeitet (siehe Abbildung 3).

Das Projekt ist in drei Teilprojekte gegliedert.

- Die Stabilität von Uferböden (in Kooperation mit der Universität Kiel)
- Die Ökosystemleistungen naturnaher Ufer im Vergleich mit technisch gesicherten Ufern (in Kooperation mit der Universität Göttingen)
- Zusammenfassende Empfehlungen für die WSW wo und in welchem Ausmaß Rückbaumaßnahmen technisch gesicherter Ufer möglich sein können und die Herausstellung der Vorteile für Schifffahrt und Natur.

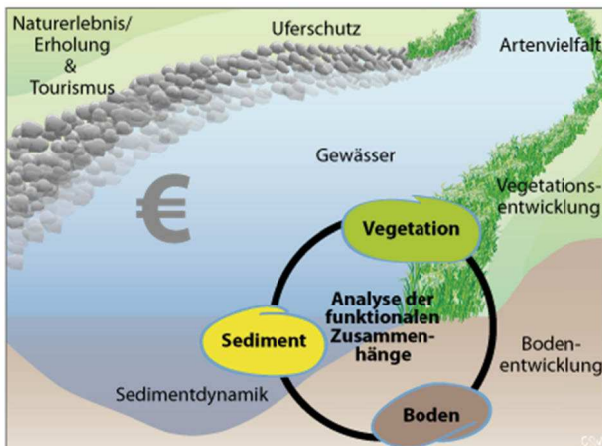


Abbildung 3: Forschungsschwerpunkte des interdisziplinären Projekts ElbService

4.1 Bodenstabilität

Die Kombination von bodenmechanischen Untersuchungen mit Analysen der Boden- und Vegetationsentwicklung erbringt konkrete Beschreibungen und Werte der Widerstandskraft der Uferböden gegenüber hydrodynamischen Belastungen insbesondere des Wellenangriffes. 22 stratifiziert und randomisiert ausgewählte Uferstandorte entlang der Tideelbe wurden für die Boden- und Vegetationsanalysen beprobt. Die Standorte decken den Salinitätsgradienten im Längsverlauf der Tideelbe sowie einen Substratgradienten von Sand zu Ton ab. An jedem Standort wurde der horizontale Wasser-Land-Gradient beachtet, indem jeweils das vegetationslose Watt, Röhricht- und Grünlandböden beprobt wurden. Somit fanden auch verschiedenen Phasen der Bodenentwicklung Berücksichtigung. Der vertikale Gradient ist durch die Beprobungstiefen abgedeckt.

Zyklische Belastungsversuche mit ungestörten Uferbodenproben wurden eingesetzt, die Wellenbelastung der Böden auf der Aggregatsebene (Mesoskala) zu simulieren (Baumgarten et al. 2012). Mittels dieser Experimente wird der zyklische Kompressibilitätsindex (Cn) und der Elastizitätsindex (EI) abgeleitet (Peth & Horn 2006), um das Verhalten des Bodenmaterials unter Belastung zu beschreiben. Die intrinsischen Bodencharakteristika der Mikroskala werden mit rheologischen Messverfahren ermittelt. Die Ergebnisse sollen darüber Aufschluss geben, welche kritische Belastung notwendig ist, dass die mikrostrukturellen Eigenschaften des Bodenmaterials irreversibel verlorengehen, bzw. welche Grade der Belastung die Mikrostruktur erträgt und trotz der einwirkenden Störungen nicht kollabiert.

Die Stabilität der ufernahen Böden soll anhand der bodenmechanischen Untersuchungen abgeleitet werden und in Zusammenschau mit den Boden – und Vegetationsanalysen parametrisiert werden. Mittels sogenannter Pedotransfer-Funktionen besteht die Möglichkeit, das Kriterium Stabilität auf standardisierte Boden- und Vegetationsdaten zu übertragen. Im Idealfall können Bemessungswerte für den Rückbau naturnaher Ufer abgeleitet werden.

4.2 Ökosystemleistungen

In der Regel können sozio-ökonomische Faktoren, beispielsweise ausgedrückt in monetären Indizes, leichter kommuniziert werden als naturwissenschaftliche Erkenntnisse und sind damit für politische Entscheidungsträger durchaus relevanter. Daher wurde ein System entwickelt, mit dem es möglich ist, den Wert ökosystemarer Leistungen und Nutzstiftungen monetär zu berechnen. Die Bewertung der sogenannten Ökosystemleistungen sind also ein Mittel, die qualitativen Zustände von Lebensräumen quantitativ zu erfassen (Millennium Ecosystem Assessment 2005, TEEB 2010). Insbesondere die Auen stellen unterschiedliche Güter und Dienste zur Verfügung, als da z. B. wären: Schutz vor Überflutung, Retention oder ein hoher Erholungswert (Turner et al. 1998, Woodward & Wui 2001). Im Projekt ElbService wird davon ausgegangen, dass der Rückbau technisch gesicherter Ufer auch Vorteile in monetärer Hinsicht gemäß des Ansatzes der Ökosystemleistungen bietet. Der implizite Schutz der Natur und die somit ermöglichte Naturerfahrung durch die lokale Bevölkerung sind zwei Beispiele. Diese, aber auch andere Nutzstiftungen, sind öffentliche Güter für die kein handelbarer Preis existiert. Um die Zahlungsbereitschaft in der Bevölkerung für oder gegen Veränderungen ihrer Umgebung zu berechnen (Pearce & Pretty 1993), wurde auf eine Kombination mehrerer Ansätze zurückgegriffen, die in einer Kosten-Nutzenanalyse münden (Marggraf 2005). Da die öffentliche Wertschätzung sich aus Einzelmeinungen ergibt, wurde ein Choice-Experiment (CE) (Hanley et al. 1998, Alpizar et al. 2003) aufgesetzt, um die Zahlungsbereitschaft für unterschiedliche Alternativen im Umgang mit den Uferlebensräumen ermitteln zu können. CE ist eine Methode der quantitativen Meinungsforschung zur Ermittlung des Wertes für die Bevölkerung von nicht handelbaren Gütern und Diensten wie Biodiversität oder Erholung. So können unterschiedliche Möglichkeiten der Uferverbauung miteinander verglichen werden und ihr ökonomischer Wert tritt zu Tage.

In einer ersten Phase wurden 21 qualitative Interviews mit Anwohnern und 15 mit Interessenvertretern geführt, um das nötige Hintergrundwissen zu Wissen und Einstellungen der Bevölkerung bezüglich Uferlebensräume, Artenvielfalt, Ausprägung der Ufer und der Wahrnehmung der Tideelbe selbst aufzubauen. Diese Interviews zeigten bereits, dass es für die Bevölkerung der Region sehr wichtig ist, eine möglichst freie Sicht auf den Fluss zu haben. Der Artenschutz ist offensichtlich ebenso wichtig. Auf dieser Basis wurde die stilistische Ausgestaltung für die Hauptbefragung mittels CE entworfen.

Die Piloterhebung mittels CE im Herbst 2013 ergab, dass eine signifikante Zahlungsbereitschaft für die Förderung der Qualität von Uferlebensräumen für typi-

sche und seltene Arten besteht. Ein potentieller Rückbau von 10 Prozent der befestigten Ufer der Tideelbe würde mit 27 € pro Jahr und Haushalt unterstützt werden, solange die Sicherheit der Deiche nicht beeinträchtigt ist. Verlässlichere Ergebnisse werden mit der Auswertung der Daten aus der Haupterhebung im Frühjahr 2014 erwartet.

Mit der Einbeziehung nicht nur der technischen Kosten für Uferschutzalternativen sondern auch der monetären Werte der nicht handelbaren Güter wie Artenvielfalt und Erholung haben (lokale) Entscheidungsträger umfassendere Informationen, um zukünftig stichhaltiger und umfänglicher bezüglich ökologischer, sozialer und ökonomischer Belange zu entscheiden und zu handeln.

Die monetären Werte einzelner Maßnahmen des Rückbaus von Uferbefestigungen, oder auch größerer Maßnahmen, die besonderer gesellschaftlicher Wertschätzung unterliegen, können auf lange Sicht die hohen Investitionskosten zur Herstellung naturnaher Ufer kompensieren.

5. Ausblick

Die vorgestellten Forschungsansätze, mit Schwerpunkt auf das Projekt ElbService, sind als Beiträge zu sehen, wie Hemmnisse bei der Umsetzung von Projekten gemäß dem PIANC WwN- Konzept (siehe Kapitel 1) beseitigt werden können. Insbesondere die WwN-Elemente *Understanding the Environment* und *Making Use of Natural Processes* werden und müssen weiter vertieft und erörtert werden, um in der Praxis Anwendung zu finden. Bezogen auf die Unterhaltung und die Anlage naturnaher Uferzonen der Tidelbe können mit dem gewonnenen Naturverständnis, Empfehlungen abgeleitet werden, wie eine weithin intakte Natur für die Ziele der Schifffahrt nutzbar gemacht werden kann.

Der wichtige Schritt „Identifizierung von Win-Win-Situationen und Einbeziehung von Interessenvertretern“ kann mit dem Konzept der Ökosystemleistungen untermauert werden. Mit ElbService wird erstmals ein monetärer Wert ermittelt, der zur Förderung der Ökologie bei der Gestaltung von Flussufern einbezogen werden kann. Geldwerte sind – auch wenn es manchem schwer fällt, dies zu akzeptieren – leichter zu verstehen und zu kommunizieren als schwer greifbare Aussagen zu ökologischen Fragen, Bedingungen oder Grenzen. Diese Tatsache ermöglicht, alle Interessenvertreter gleichsam in die Entscheidungsfindung zu integrieren.

Das Wissen aus ElbService kann insbesondere helfen die Ziele, technisch gesicherte Ufer an der Tideelbe rückzubauen, umzusetzen, wie im Integrierten Bewirtschaftungsplan (Arbeitsgruppe Elbeästuar 2012) gefordert. So kann eine verbesserte Akzeptanz dieser Maßnahmen durch die unterschiedlichen Interessensvertreter und die Öffentlichkeit erwartet werden. Damit ist eines der wichtigsten Ziele des WwN-Ansatzes erfüllt.

Allerdings bestehen noch Wissenslücken im komplexen Zusammenwirken von Hydro-Morphologie, Ökologie und insbesondere in der Verknüpfung mit dem System der Ökosystemleistungen. Interdisziplinäre Forschungen, aufsetzend auf diesen ersten Schritt, und ihre Übertragung in die anwendungsbezogene Praxis werden in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen.

Danksagung

Universität Göttingen, Universität Kiel, Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Literatur

ALPIZAR, F., CARLSSON, F. & MARTINSSON, P. (2003): Using Choice Experiments for Non-Market Valuation. *Economic Issues*, **8** (1)S.: 83-110. DOI:

ARBEITSGRUPPE ELBEÄSTUAR (2012): Integrierter Bewirtschaftungsplan Elbeästuar. <http://www-natura2000-unterelbe.de/links-Gesamtplan.php>.

Freie und Hansestadt Hamburg - Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, K.-u. N. Land Niedersachsen - Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, U. u. I. R. Land Schleswig-Holstein - Ministerium für Landwirtschaft, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord & Hamburg Port authority.

BAUMGARTEN, W., NEUGEBAUER, T., FUCHS, E. & HORN, R. (2012): Structural stability of Marshland soils of the riparian zone of the Tidal Elbe River. *Soil & Tillage Research*, **125** S.: 80–88. DOI: 10.1016/j.still.2012.06.002

EHLERS, M., MÖLLER, M., JANOWSKY, R. & GÄHLER, M. (2000): Entwicklung einer Methode zur automatisierten Biotypenerfassung auf der Grundlage von HRSC-A-Scannerdaten - Abschlussbericht im Auftrag der BfG, Hochschule Vechta - Institut für Umweltwissenschaften. Vechta.

EUROPÄISCHE KOMMISSION (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasser-Rahmen-Richtlinie - WRRL). ABl. Nr. L 327 vom 22.12.2000 S. 1. 2455/2001/EG - ABl. Nr. L 331 vom 15.12.2001 S. 1, geändert durch Beitrittsakte 2003, RL 2008/32/EG - ABl. Nr. L 81 vom 20.3.2008 S. 60 2009/31/EG - ABl. Nr. L 140 vom 23.04.2009 S. 114. Europäische Kommission.

FUCHS, E., BAUER, E.-M., HEUNER, M., SCHMIDT-WYGASCH, C. & SCHRÖDER, U. (2013): Interdisciplinary research on new approaches for future management of the River Elbe. IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg.

GÄHLER, M., JANOWSKY, R. & SCHRÖDER, U. (2002): Automatisierte Biotypenklassifikation auf Basis höchstauflösender Flugzeugscannerdaten. Fernerkundung und GIS, Neue Sensoren - innovative Methoden, Salzburg, Wichmann.

HANLEY, N., WRIGHT, R. & ADAMOWICZ, V. (1998): Using Choice Experiments to Value the Environment. *Environmental and Resource Economics*, **11** (3-4)S.: 413-428. DOI: 10.1023/A:1008287310583

HEUNER, M. (2006): Weiterentwicklung, Anwendung und Validierung von Lebensraumeignungsmodellen verschiedener Tideröhrichte der Unter- und Außenweser sowie der Unter- und Außenelbe auf Grundlagen von Daten der WSÄ Hamburg und Bremerhaven - Abschlussbericht – Endfassung unter Berücksichtigung weiterer hydrologischer Daten, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Universität

Karlsruhe (TH) Institut für Wasser und Gewässerentwicklung. S. 60.

HEUNER, M. (2013): Wellenexperimente - zwei Pionierröhrichte im Vergleich. in: Die Vegetation an Tidelbe und Tideweser im Klimawandel. E.-M. Bauer & M. Heuner (Hrsg.). Koblenz, Bundesanstalt für Gewässerkunde: S.: 10-11.

MARGGRAF, R. (2005): Ökonomische Bewertung bei umweltrelevanten Entscheidungen Einsatzmöglichkeiten von Zahlungsbereitschaftsanalysen in Politik und Wirtschaft. Ökologie und Wirtschaftsforschung. Metropolis-Verl., Marburg.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005): Ecosystems and human well-being : Synthesis. The Millennium Ecosystem Assessment series. Washington, DC, World Resources Institute.

PEARCE, D. W. & PRETTY, J. N. (1993): Economic Values and the Natural World. Earthscan.

PETH, S. & HORN, R. (2006): The mechanical behavior of structured and homogenized soil under repeated loading. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **169** (3):S.: 401-410. DOI: 10.1002/jpln.200521942

PIANC (2008): "Working with Nature. PIANC Position Paper.", October 2008, revised January 2011. from <http://www.pianc.org/wwwpositionpaper.php>.

PÖUN (1997): Umweltverträglichkeitsstudie zur Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt, Teil 1: Umweltverträglichkeitsuntersuchung (UVU). Untersuchung im Auftrag der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg und der Freien und Hansestadt Hamburg, Wirtschaftsbehörde, Amt Strom- und Hafenbau, Planungsgruppe Ökologie + Umwelt Nord (PÖUN). Hamburg.

SCHRÖDER, U. (2004a): Analyse der aktuellen räumlichen Veränderungen ufernaher Röhrichte und Uferstauden unter besonderer Berücksichtigung ihrer historischen Entwicklung (der letzten 30 bis 50 Jahre) - Untersuchungen im Rahmen der Beweissicherung zur Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt (14,5 m Ausbau). BfG-Bericht, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). Koblenz. **BfG-1441**.

SCHRÖDER, U. (2004b): Analysis of Shift in Reed Habitats along the Tidal River Elbe. in: Remote Sensing & GIS for Environmental Studies: Applications in Geography; Göttinger Geographische Abhandlungen. S. Erasmí, B. Cyffka & M. Kappas (Hrsg.). Göttingen. **113**: S.: 109-115.

TEEB (2010): The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB.

TEMMERMAN, S., MEIRE, P., BOUMA, T. J., HERMAN, P. M. J., YSEBAERT, T. & DE VRIEND, H. J. (2013): Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature*, **504** (7478):S.: 79-83. DOI: 10.1038/nature12859

TURNER, R. K., VAN DEN BERGH, J. C. J. M., BARENDREGT, A. & MALTBY, E. (1998): Ecological-economic analysis of wetlands: Science and Social-Science Integration.

WASSER- UND SCHIFFFAHRTSDIREKTION NORD (1999): Planfeststellungsbeschluss zur Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt, Bundesstrecke, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord (WSD-Nord). Kiel.

WHG (2009): WHG - Wasserhaushaltsgesetz. Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts. vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt geändert durch Artikel 4 Absatz 76 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154). WHG. Bundesrepublik Deutschland.

WOODWARD, R. T. & WUI, Y.-S. (2001): The economic value of wetland services: a meta-analysis. *Ecological Economics*, **37** (2):S.: 257-270. DOI: 10.1016/S0921-8009(00)00276-7

Verfasser

Dipl.-Geograph Uwe Schröder

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Referat U3 Vegetationskunde, Landschaftspflege
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/1306-5140
E-Mail: uwe.schroeder@bafg.de

Dr. Carolin Schmidt-Wygasch

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Referat U3 Vegetationskunde, Landschaftspflege
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/1306-5027
E-Mail: schmidt-wygasch@bafg.de

Maike Heuner

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Referat U2 Ökologische Wirkungszusammenhänge
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/1306-5960
E-Mail: heuner@bafg.de

Dr. Elmar Fuchs

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Referat U2 Ökologische Wirkungszusammenhänge
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/1306-5338
E-Mail: fuchs@bafg.de

Sachstand der PIANC Incom WG 141: Bemessungsgrundlage für Binnenwasserstraßen

Dr.-Ing. Bernhard Söhngen,
Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Prof. Dr. Katrien Eloot,
Flämische Regierung, Ministerium für Mobilität und öffentliche Arbeiten, Forschung im Bereich Wasserbau, Flandern

Zusammenfassung

Die Arbeitsgruppe PIANC INCOM WG 141 wurde 2010 gegründet, um zur Unterstützung der Planer von Binnenwasserstraßen Bemessungsstandards in Analogie von Standards für Seeschiffe zu entwickeln, wie sie beispielsweise von der PIANC MARCOM WG 49 ausgearbeitet wurden. Es stellte sich heraus, dass der MARCOM-Ansatz hinsichtlich der angegebenen Zahlenwerte aufgrund der besseren Steuerbarkeit von Binnenschiffen, ihrer niedrigeren Geschwindigkeiten und der geringeren Schäden bei Havarien generell nicht auf Binnenwasserstraßen anwendbar ist, wohl aber das methodische Vorgehen. Hinzu kommt, dass bei der Bemessung von Binnenwasserstraßen besondere Bemessungsaspekte stärker zu beachten als bei Seeschiffen, wie der häufig stärkere Einfluss von Querströmungen oder die schlechteren Sichtbedingungen. Aus diesen Gründen wird von WG 141 eine neue Bemessungsmethode empfohlen. Sie betrifft insbesondere die erforderlichen Fahrrinnenbreiten in Kanälen und Flüssen, die Breiten und Höhen unter Brücken, den Mindestdurchmesser von Wendeböden oder die Längen- und Breitenabmessungen von Schleusenvorhöfen. Es fanden insgesamt acht Arbeitsgruppenbesprechungen statt, zwei Interimtreffen zu besonderen Fragen, ein Workshop im Rahmen der Smart Rivers Konferenz im vergangenen Jahr sowie mehrere internen Workshops. In diesen Treffen konnte die Arbeitsgruppe die Überprüfung der bestehenden Richtlinien abschließen. Sie untersuchte mehrere Best Practice-Beispiele, v.a. für Fahrrinnenbemessungen in Flüssen, Abmessungen von Schleusenvorhöfen und Brückendurchfahrtbreiten. Ein erster Entwurf der zukünftigen Richtlinien befindet sich momentan in Vorbereitung. Er baut in erster Linie auf den Beiträgen zur Smart Rivers Konferenz 2013 und auf dem vorliegenden Beitrag auf sowie auf den Vereinbarungen des letzten Treffens im Februar dieses Jahres. Dieser Beitrag stellt die Arbeitsweise der Arbeitsgruppe und ihre Erkenntnisse vor. Die drei empfohlenen Bemessungsschritte „Konzept-Design-Methode“ (Concept Design Method), „Bemessung aus Erfahrung“ (Best Practice Approach) und „Detaillierte Bemessung“ (Detailed Design) werden anhand von Beispielen ausführlicher dargestellt. Wie bei allen Bemessungsszenarien müssen mögliche zukünftige oder erforderliche Bedingungen für die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs bewertet oder festgelegt werden. Zu diesem Zweck stellt WG 141 den Planern einen geeigneten Ansatz zur Verfügung, welcher den Faktoren Schiffstyp, Schiffsgeschwindigkeit und Verkehrsstärke sowie den örtlichen Randbedingungen Rechnung trägt.

1. Einleitung

Die Arbeitsgruppe PIANC-INCOM WG 141 "Design Guidelines for Inland Waterways" (Bemessungsrichtli-

nien für Binnenwasserstraßen) wurde unter anderem aufgrund des Mangels an international anerkannten Richtlinien für die Abmessungen von Binnenwasserstraßen gegründet. Im Gegensatz zur Binnenschifffahrt bestehen solche Regelungen für die Seeschifffahrt für besondere Bemessungssituationen, z.B. Zufahrtkanäle für Seeschiffahrtshäfen. Es besteht also ein Bedarf an geeigneten neuen Richtlinien, insbesondere für die Mindestbreiten von Fahrrinnen, von Schleusenvorhöfen oder von Brückendurchfahrten, u.a. als Unterstützung für etliche neue Projekte zum Ausbau der Wasserstraßen. Auch die Veränderungen in der Schiffsflotte (vor allem durch den wachsenden Anteil längerer und breiterer Schiffe mit größerem Tiefgang und höherer Motorleistung) und somit die Abmessungen der Bemessungsschiffe sind Motivation, das bestehende verkehrswasserbauliche Wissen auf den neuesten Stand zu bringen. Allgemein sind diese neuen Schiffe der Grund, warum breitere Schleusenkammern, Vorhöfen und Fahrrinnen benötigt werden. Andererseits haben die neuen Schiffe meist bessere nautische Eigenschaften als die älteren Fahrzeuge. Beispielsweise haben sie meist zwei Propeller anstatt nur einem, sie sind mit Zwillings- statt anstatt Einzelrudern ausgerüstet und haben starke Bugstrahlruder oder passive Bugruderanlagen. Diese schiffstechnische Entwicklung, die von einem allgemeinen Rückgang der Anzahl der auf den Binnenwasserstraßen verkehrenden Fahrzeuge begleitet ist, bietet die Chance, die Breitenabmessungen des Fahrwassers trotz größerer Schiffsbreiten zu begrenzen. Außerdem stehen neue und bessere Informationsdienste zur Verfügung, beispielsweise auf der Basis von GPS, ECDIS und AIS. Durch die laufenden Verbesserungen bei der Aktualisierung von bathymetrischen Daten, bessere Wasserstandsprognosen sowie die numerische Modellierung von Flüssen stehen zudem detailliertere Daten über lokale Wassertiefen und Strömungsgeschwindigkeiten zur Verfügung. Dies wird voraussichtlich dazu führen, dass künftig viel mehr Schiffe autopilotiert werden, wodurch die Kapazität der bestehenden oder eingeschränkt nutzbaren Wasserstraßen so weit wie möglich ausgenutzt werden kann.

Anders als in der maritimen Schifffahrt ist der Schiffsverkehr mit Binnenschiffen generell mit weniger Gefahren verbunden. So ist z. B. der Kontakt mit Ufersicherungen mehr oder weniger eine Standardsituation beim Befahren von Kanälen. Dies erscheint vertretbar, weil die Schiffsgeschwindigkeiten niedriger sind und Binnenschiffe über eine deutlich geringere Masse verfügen als Seeschiffe. Ihre kinetische Energie ist damit sehr viel geringer als die von Seeschiffen. Dies wird in folgendem Beispiel deutlich: Dabei wird für ein Seeschiff eine typische Geschwindigkeit 12 Knoten (etwa 22 km/h) angenommen, die im Bericht von MARCOM WG 49 über die Dimensionierung von Zufahrtkanälen zu Häfen (PIANC 2014) die Grenze beschreibt, ab der ein Zuschlag an erforderlicher Fahrrinnenbreite zur Berücksichtigung höherer Schiffsgeschwindigkeit erfolgt. Für Binnenschiffe wird eine Geschwindigkeit von 13 km/h angesetzt, die sich als Durchschnittswert am freifließenden Rhein ergab. Weiterhin wird angenommen, dass die Masse der größten Seeschiffe in etwa um das Zehnfache größer ist als die der größten Schubverbände auf den Binnenwasserstraßen. Im Ergebnis errechnet sich ein Faktor von ca. 29, um den die kinetische Energie und damit das Schadenspotenzial von Seeschiffen größer sind als von Binnenschiffen. Dar-

über hinaus übersteigen die Antriebskräfte bzw. die Ruderkräfte im Verhältnis zur Schiffsmasse bei Binnenschiffen das Verhältnis bei Seeschiffen etwa um das Vierfache. Bei Berücksichtigung sämtlicher Faktoren sind die Reaktionszeiten der größten Seeschiffe etwa um das Sechsfache länger als die der Binnenschiffe. Das heißt, dass das Schadenspotenzial von Binnenschiffen erheblich niedriger ist und dass ihre Fähigkeit, Schäden zu vermeiden aufgrund der besseren Steuerbarkeit größer ist. Die Standards für Seeschiffe, wie sie beispielsweise im oben erwähnten MARCOM-Bericht beschrieben sind, müssen folglich höher angesetzt werden als für Binnenschiffe.

Dies zeigt sich, wenn der MARCOM-Ansatz für gerade Fahrwasserabschnitte ohne signifikanten Seitenwind auf Binnenschiffe angewendet wird, und zwar unter der Annahme folgender Verhältnisse: gute Manövrierfähigkeit, verhältnismäßig niedrige Schiffsgeschwindigkeiten (< 8 Knoten), geböschte Ufer, glatte und geringer feste Sohle sowie ein Verhältnis zwischen Wassertiefe d und Tiefgang T von 1,25 bis 1,5. Daraus ergibt sich für Kanäle eine Mindestbreite (auf Kielebene), die bei einspuriger Verkehrsführung abhängig von den nautischen Hilfsmitteln (ausgezeichnet oder gut) etwa das 2,2- bis 2,4-fache der Schiffsbreite B beträgt. Bei zweispurigem Verkehr ist eine Mindestbreite von 4,8 bis 5,7 Mal B erforderlich, wiederum abhängig von den verfügbaren nautischen Hilfsmitteln und der Verkehrsstärke (gering bis gemäßigt). Diese Werte sind größer als die von WG 141 empfohlenen Werte für gerade Kanäle, die in Abhängigkeit von der gewählten Leichtigkeitskategorie bei ca. $2 B$ für einspurigen und 3 bis $4 B$ für zweispurigen Verkehr liegen. Die Unterschiede zwischen dem MARCOM-Ansatz und WG 141 sind in Bezug auf den zweispurigen Verkehr am größten: Bei dieser Fahrsituation besteht bei Seeschiffen ein wesentlich höheres Schadenspotenzial als bei Binnenschiffen. Die Unterschiede sind jedoch auch darin begründet, dass Binnenschiffe im Verband fahren können, mit unterschiedlichen Länge-Breite-Verhältnissen (L/B). Seeschiffe hingegen verkehren in der Regel als Einzelfahrer und ihr L/B -Verhältnis ist aus hydrodynamischen Gründen weniger variabel. Dies rechtfertigt wiederum die Nutzung des Parameters B als einzigen maßgebenden Skalierungsparameter für die Fahrwasserbemessung bei Seeschiffen - mit wenigen Ausnahmen wie z.B. Zusatzbreiten in Kurven. Die erforderlichen Abmessungen der Wasserstraßen für Binnenschiffe können im Gegensatz dazu u.a. stark mit L/B variieren. Aus diesen Gründen können die im Bericht von MARCOM WG 49 über Zufahrtskanäle zu Häfen genannten Bemessungswerten für die erforderliche Fahrrinnenbreite von Seeschiffen grundsätzlich nicht auf Binnenwasserstraßen übertragen werden. Zu Vergleichszwecken ist der MARCOM-Ansatz jedoch eine nützliche Referenz für zukünftige Richtlinien für Binnenschiffe im Falle hoher Leichtigkeitsanforderungen, wenn Obergrenzen für Fahrwasserabmessungen definiert oder Unterschiede zwischen zwei Bemessungsfällen (z.B. mit und ohne Seitenwind) ermittelt werden müssen.

Niedrigere Leichtigkeitsstandards als bei Seeschiffen werden auch aus ökologischen Erwägungen verlangt (hier ist insbesondere die Europäische Wasserrahmenrichtlinie zu beachten). Aufgrund der Auswirkungen des Klimawandels auf frei fließende Gewässer könnten Planer und Betreiber von Wasserstraßen zudem gezwungen sein, Fahrrinnen – trotz größerer Fahrzeuge –

sogar zu verengen oder ihren Abstand zu ökologisch sensiblen Gebieten zu vergrößern. Diese Zwänge haben grundsätzlich Auswirkungen auf die Sicherheit und Leichtigkeit des Binnenschiffverkehrs. All diese Aspekte zeigen die Notwendigkeit, die Mindestanforderungen für die Abmessungen von Wasserstraßen festzulegen, vor allem unter Berücksichtigung nautischer Gesichtspunkte. Dies bedeutet nicht, dass diese Mindestabmessungen von WG 141 vorgeschlagen werden. Ganz im Gegenteil: Mit Blick auf die Aspekte Sicherheit und Leichtigkeit sowie betriebliche Effizienz des Schiffverkehrs sollte die Bemessung grundsätzlich möglichst großzügig erfolgen. Mit Blick insbesondere auf die Auswirkungen auf die Umwelt, sozio-ökonomische Aspekte oder die politisch-wirtschaftlichen Aspekte eines Ausbaus der Wasserstraßen sollte die Bemessung andererseits so eng wie erforderlich sein - aber nicht mehr als das. Eine sinnvolle Vorgehensweise besteht also darin, gerade diese Untergrenzen zu definieren, um unnötige Diskussionen mit Gegnern von Ausbaumaßnahmen zu vermeiden und sich ausschließlich auf die nautischen Aspekte zu konzentrieren. Dies ist die Hauptaufgabe der Arbeitsgruppe PIANC-INCOM WG 141. Adäquate Mindestabmessungen werden jedoch stark von den örtlichen Randbedingungen beeinflusst. Dies ist der Grund, warum der heute übliche und allgemein anerkannte Bemessungsansatz, der nachfolgend als Konzept-Bemessungs-Methode bezeichnet wird und die Grundlage der existierenden Richtlinien bildet, in solchen Fällen versagt, in denen besondere Faktoren zu berücksichtigen sind, die stark von den Bemessungsszenarien der Richtlinien abweichen, oder wenn die Anwendung existierender Bemessungsformeln ihre Grenzen erreicht. Zu den besonderen Faktoren zählen beispielsweise, vor allem wenn sie kombiniert auftreten:

- Ungünstige Fahrwasserbedingungen wie starke Krümmung, geringe Tiefe, geringe Fahrwasserbreite, große Fließgeschwindigkeiten, starke Querströmungen, hohe Turbulenzen, große Wasserspiegelneigung, unregelmäßiger Uferverlauf.
- Schlechte hydrologische Bedingungen und Wetterverhältnisse wie geringe Voraussicht, starker Wind, stark steigender oder fallender Wasserstand, Niedrig- oder Hochwasser.
- Schiffstyp, Steuerungseinrichtung und Instrumentierung: Schiffe ohne Bugstrahlruder, geringe Antriebsleistung, keine modernen Informationssysteme wie Radar, GPS, ECDIS, AIS.
- Ungewöhnliche Beladung wie sehr großer Tiefgang in Relation zur Wassertiefe, Leerfahrt bzw. stark hecklastig ballastiertes Schiff, gefährliche Ladung so wie sehr schnelle oder langsame Schiffsgeschwindigkeit.
- Besondere Fahrsituationen wie Überholungen oder starker Verkehr.

Daher wurde von WG 141 eine dreistufige Bemessungsmethode (Söhnngen, Rettemeier, 2013b) vorgeschlagen, die in Kapitel 4 näher erläutert wird. Da die Methode in einem gewissen Widerspruch zu den von INCOM definierten Aufgaben steht, werden die Entscheidungen von WG 141 zu diesem Punkt im nachfolgenden Kapitel 3 kurz erörtert (Söhnngen, 2013, Söhnngen & Rettemeier, 2013a). Der letzte Vorschlag zur

Berücksichtigung der Aspekte Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs wird in Kapitel 5 ausführlicher dargestellt, da er alle relevanten Bemessungsfälle betrifft. Abschließend wird ein Ausblick auf weitere und laufende Aktivitäten in WG 141 gegeben.

2. Diskussion der TOR

Gemäß Auftrag der PIANC Kommission für Binnenschifffahrt vom Juni 2009 (Terms of Reference, TOR) ist es die Aufgabe von WG 141, „aktuelle Beiträge, Datenquellen, Forschungsarbeiten und Erfahrungsberichte zu überprüfen, die für die Bemessung der Binnenwasserstraßen relevant sind, und eine Veröffentlichung durch PIANC vorzubereiten, welche Richtlinien für Planer, Entwickler und Betreiber geplanter und bestehender Binnenwasserstraßen bereitstellt“. Der Bericht soll sich „allen wichtigen Themen widmen, die im Zusammenhang mit den Einschränkungen stehen, welche sich aus der gewerblichen Schifffahrt und dem Verkehr von Sportbooten auf Flüssen oder Kanälen ergeben“. Dabei sollen u. a. auch die Effekte von „Sicht, Strömung, Wind, Querströmungen und Schiffsgeschwindigkeit“ Berücksichtigung finden. Die Empfehlungen sollen sich auf die Schwerpunkte „Breite und Tiefe der Fahrinne, Einfluss der Krümmung von Kurven und Abmessungen von Schleusenvorhöfen“ sowie Brückendurchfahrtbreiten konzentrieren. Diese umfassende Anforderung von INCOM wurde bei der ersten Zusammenkunft von WG 141 kontrovers diskutiert. Aufgrund der Erfahrungen der Mitglieder von WG 141, der tatsächlichen Bedeutung einer im stetigen Wandel begriffenen Flotte und im Hinblick darauf, was eine Arbeitsgruppe in einem beschränkten zeitlichen Rahmen leisten kann, beschloss die Arbeitsgruppe, sich auf die gewerbliche Schifffahrt zu konzentrieren.

Die TOR verlangen als Aufgabe die „Untersuchung der tatsächlichen Schiffsabmessungen gemäß den bereits vereinbarten Standards wie CEMT, UNECE, USACE und die „Formulierung“ entsprechender „Abmessungen für Fahrwasser und Infrastruktur“. Dies wurde nicht in Frage gestellt, denn aktuelle Projekte hängen überwiegend mit dem Wasserstraßenausbau für diese neuen Standards zusammen. Die Arbeitsgruppe wurde weiterhin beauftragt, sich mit „einspurigem und zweisporigem Verkehr im Fahrwasser zu befassen sowie mit der damit verbundenen Dichte und Überwachung des Verkehrs, die den wirtschaftlichen Ausbau von kleinen oder wenig genutzten Wasserstraßen fördern wird“. Bei der „Überprüfung der Fahrwasserabmessungen“ sind auch die „laufenden Forschungsarbeiten und -beiträge, die sich mit dem Klimawandel und der größtmöglichen Verringerung der Auswirkungen des Schiffsverkehrs auf das Ökosystem des Fahrwassers befassen, zu berücksichtigen“. „Sofern möglich, sind Verweise auf Maßnahmen zum Hochwasserschutz und zur Vermeidung negativer Auswirkungen von Niedrigwasserphasen zu berücksichtigen, obwohl anerkannt wird, dass die derzeitigen umfangreichen Forschungstätigkeiten zum gegenwärtigen Zeitpunkt möglicherweise noch keine Schlussfolgerungen zulassen“.

Für die Mitglieder der Arbeitsgruppe stellte sich die Frage, wie diese weitreichenden Aufgaben in dem verfügbaren Zeitrahmen erfüllt werden sollten. Andererseits ist dies vielleicht auch nicht erforderlich, wenn technische Mindestgrenzen für die Abmessungen von

Wasserstraßen unter Berücksichtigung der notwendigen Sicherheits- und Leichtigkeitsstandards festgelegt werden. In diesem Fall werden die Anforderungen einer in wirtschaftlicher, ökologischer und hydraulischer Hinsicht annehmbaren Bemessung zum Teil automatisch mit berücksichtigt, da dieser Ansatz sowohl eine Unterdimensionierung als auch eine Überdimensionierung vermeidet. Zudem wird dadurch unnötigen Diskussionen über die Art und das Ausmaß geplanter Ausbaumaßnahmen an den Wasserstraßen vorgebeugt. Aus diesen Gründen wird sich die Arbeit in WG 141 auf technische Aspekte sowie die Anforderungen an die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs beschränken. Das bedeutet insbesondere, dass WG 141 die vorgeschlagenen Ausbaumaßnahmen nicht infrage stellt. Diese sind grundsätzlich das Ergebnis intensiver ökonomischer und ökologischer Studien und liegen somit nicht im Bereich der Empfehlungskompetenz der WG 141. In diesen Studien wird auch definiert, welche Schiffe zu berücksichtigen sind. Auch diese Festlegung wird als gegebene Randbedingung akzeptiert. Wichtige nautische Aspekte der Bemessung hingegen, die sich wiederum allgemein auf die Ausbaumaßnahmen und somit die Planungsstandards auswirken könnten, müssen jedoch in den Empfehlungen betrachtet werden, zum Beispiel die Notwendigkeit des zweisporigen Verkehrs oder die Wahl geeigneter Sicherheits- und Leichtigkeitsstandards. Die zukünftigen Richtlinien (siehe Kapitel 4.2) müssen auch einen geeigneten Ansatz festlegen, mit dem sämtliche relevanten Bemessungsaspekte berücksichtigt werden können. Dies betrifft neben der Klärung des konkreten Bemessungsfalls auch die Auswahl relevanter Randbedingungen und geeigneter Bemessungsmethoden, die Durchführung der eigentlichen Bemessung sowie die Überprüfung der Auswirkungen und der Nachteile der Ausbaumaßnahmen im Allgemeinen und der oben genannten Punkte im Besonderen, damit gegebenenfalls die Bemessungsparameter verfeinert werden können. Konkrete Werte, z. B. die erforderliche Mindestlänge von Schleusenvorhöfen, werden jedoch nur aus nautischer Sicht angegeben!

Die zukünftigen Empfehlungen von WG 141 übernehmen daher die geplanten Maßnahmen generell als gegebene Randbedingung für die nautische Auslegung, enthalten aber dennoch Hinweise, wie sich die nautische Auslegung auf die Maßnahmen auswirken könnte. Daher beinhalten die zukünftigen Empfehlungen keine eigentlichen Empfehlungen zu Notwendigkeit und ökologischer Vertretbarkeit von Maßnahmen oder zu geeigneten Schiffstypen, sondern beleuchten die Bemessung lediglich aus der Perspektive Ursache/Wirkung und Nautik. Dieser restriktive Ansatz wurde nicht gewählt, weil die Mitglieder der Arbeitsgruppe nicht in der Lage oder willens gewesen wären, umfassendere Antworten zu liefern (in ihrer beruflichen Tätigkeit sind sie häufig mit diesen Fragestellungen befasst), sondern weil die kaum mit den Zielen von PIANC in Einklang gebracht werden könnten. Zudem könnte es sich selbst innerhalb der Arbeitsgruppe als schwierig erweisen, einen Konsens in diesen sensiblen Fragen zu erzielen. Folglich sind alle zuvor genannten Bemessungsaspekte außerhalb der zukünftigen Empfehlungen von WG 141 zu behandeln. Nichtsdestoweniger wird der Bericht ausreichend Informationen und Feedback zum Planungsprozess zur Verfügung stellen, auch wenn er sich auf die nautischen Aspekte beschränkt.

INCOM erwähnte auch „sämtliche laufenden und relevanten PIANC-Berichte“. Besondere Aufmerksamkeit sollte der Arbeitsgruppe MARCOM WG 49 und ihre oben schon diskutierten Richtlinien zur Bemessung von Zufahrtskanälen zu Häfen (PIANC 2014) für Seeschiffe gelten. Dieser Verweis führte zur Diskussion über die Anwendbarkeit des entsprechenden MARCOM-Ansatzes. Dieser beinhaltet eine Tabelle mit den erforderlichen Mindestabmessungen wie z. B. Fahrwasser-Mindestbreiten mit Zuschlägen, um besondere Einflüsse auf die Bemessung wie Wind, Querströmungen oder Sohlenrauigkeit zu berücksichtigen. Ein Anwendungsbeispiel findet sich in Kapitel 1. Ergebnis der Diskussion war, wie weiter oben erwähnt, die Entscheidung, den MARCOM-Ansatz als methodische Grundlage für die vorgeschlagene Konzept-Bemessungs-Methode für die Binnenschifffahrt zu verwenden, jedoch nur für besondere Bemessungsszenarios und mit abweichenden Werten für die erforderlichen Mindestabmessungen der Wasserstraße. Allgemein empfiehlt WG 141 einen 3-stufigen Bemessungsansatz, insbesondere aufgrund der großen Vielfalt der Randbedingungen in der Binnenschifffahrt im Vergleich zu Seeschiffen. Dieser umfasst die „Konzept-Bemessungs-Methode“ (Concept Design Method), die „Bemessung aus Erfahrung“ (Best Practice Approach) und eine „Detaillierte Bemessung“ (Detailed Design).

Aufgrund dieser Vielfalt der Randbedingungen im Binnenbereich könnte man zu der Einschätzung gelangen, dass Standards für Binnenschiffe möglicherweise kaum zu definieren sind, insbesondere angesichts der weltweit unterschiedlichen Schiffstypen und Fahrwasserbedingungen. Doch vor allem die Tiefen der großen Binnenwasserstraßen, die den Maximaltiefgang der Schiffe bestimmen, sind aus morphologischen und hydrologischen Gründen weltweit ähnlich mit Werten zwischen 2 und 3 m bei Niedrigwasser. Diese definieren den bauartbedingten Maximaltiefgang der Schiffe. Die zugehörige Schiffsbreite ergibt sich aus schiffbautechnischen und wirtschaftlichen Gründen zur Erzielung einer größtmöglichen Ladekapazität bei Verwendung von Stahl als Baumaterial als Vielfaches des Schiffstiefganges. Diese Randbedingungen führen dazu, dass die einzelnen Fahrzeuge, die auf den unterschiedlichen Flüssen weltweit verkehren, eine ähnliche Breite haben. Zusammen mit den variierenden Tiefgängen bei unterschiedlichen Wasserständen und der Notwendigkeit, Flüsse mit starken Querströmungen und engen Kurven zu befahren, führten diese flussmorphologischen und schiffbautechnischen Faktoren zu ähnlichen Schiffsmo-
dellen hinsichtlich Größe, installierter Motorleistung und Art und Zahl der Ruderanlagen. Eine Standardisierung erscheint also möglich, auch wenn weitaus mehr Einflüsse zu berücksichtigen sind als bei den Zufahrtskanälen für Seeschiffe. Die Entscheidungen der Arbeitsgruppe lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Fokussierung auf Binnenschiffe und Frachtschiffe
- Sichtung bestehender Richtlinien und Verwendung der Empfehlungen für die Konzept-Bemessungs-Methode
- Erfassung und Erörterung von Praxisbeispielen als zweite Bemessungsgrundlage, falls die relevanten besonderen Bemessungsaspekte von den verfügbaren Richtlinien nicht abgedeckt werden

- Hilfestellung zur Durchführung des vorgeschlagenen verallgemeinerten Bemessungsansatzes, z. B. zum Abklären des Bemessungsfalls, zur Auswahl der relevanten Randbedingungen, zur Festlegung geeigneter Leichtigkeitskategorien, zur Berücksichtigung von Nachteilen der Bemessung für die geplante Ausbaumaßnahme
- Ausschließliche Fokussierung auf nautische Aspekte und Anerkennung der vorgegebenen allgemeinen Ausbaustrategie als Randbedingung für die Bemessung
- Generelle Anwendung eines 3-stufigen Bemessungsansatzes: Konzept-Design, Bemessung aus Erfahrung und gegebenenfalls fallweise Untersuchungen mit Simulationsverfahren

3. Fortschritte der Arbeitsgruppe

Die Kickoff-Veranstaltung fand während des PIANC-Kongresses im Jahr 2010 in Liverpool statt (s. a. Tabelle 1, in der wichtige Informationen über die Fortschritte der Arbeitsgruppe zusammengefasst sind). Dabei ergab die Diskussion über die TOR in Liverpool und bei der nächsten Sitzung in Karlsruhe, dass die Arbeitsgruppe wie oben erwähnt nicht alle Aufgaben der INCOM erfüllen kann. So wurde beispielsweise beschlossen, die Arbeit der Gruppe auf Frachtschiffe und technische Aspekte zu begrenzen und im ersten Schritt die Sportschifffahrt auszuklammern. Bei der detaillierten Sichtung vorhandener Richtlinien zu diesen Themen während der nächsten beiden Treffen in Brüssel und Paris zeigten sich zudem beträchtliche Differenzen, z. B. in Bezug auf die geeigneten Mindestabmessungen von Wasserstraßen oder die Länge von Schleusenvorhöfen in den verschiedenen Richtlinien. So definieren deutsche und französische Richtlinien geringere Werte im Vergleich z.B. zu russischen oder chinesischen Richtlinien. Auch die existierenden Abmessungen, z. B. von Fahrinnenbreiten in Flüssen, fallen von Land zu Land oder von Fluss zu Fluss sehr unterschiedlich aus. Erklärt werden können diese Unterschiede u.a. durch besondere Randbedingungen: beispielsweise solche in engen Kanälen mit niedrigen Schiffsgeschwindigkeiten, bei sehr gut ausgerüsteten Schiffe oder optimal geschulten Schiffsführern, was in einigen Fällen Argumente für einen reduzierten Standard lieferte. Die großen seegängigen Schiffe dagegen, die mit hohen Geschwindigkeiten die großen Flüsse Chinas befahren und eine höhere Risikostufe darstellen, werden Planer und Betreiber dieser Wasserwege zwingen, höhere Niveaus für die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffverkehrs zu fordern. Aus diesem Grund traf die Arbeitsgruppe die Entscheidung, die enormen Unterschiede in den Bemessungsempfehlungen der verschiedenen Länder zu erläutern und Argumente als Entscheidungshilfe für die Wahl des jeweils geeigneten Bemessungsstandards zusammenzustellen. Dies hilft möglicherweise auch, die unterschiedlichen Richtlinien aneinander anzugleichen.

Bei ihren nächsten beiden Zusammenkünften in Brüssel und Bonn identifizierte die Gruppe in einem ersten Schritt geeignete Mindestabmessungen von Kanälen. Die Breiten und Tiefen in geraden Abschnitten und die dazugehörigen lichten Durchfahrtshöhen und -breiten von Brücken, Durchmesser von Wendebecken oder

Längen von Liegeplätzen wurden aus den vorhandenen Richtlinien und Praxisbeispielen abgeleitet. Es stellte sich heraus, dass Empfehlungen für konkrete Werte möglich erscheinen, z. B. die angemessene Breite, ausgedrückt als Vielfaches der Schiffsbreite, jedoch getrennt nach entsprechende Kategorien der Leichtigkeit des Schiffsverkehrs, welche überwiegend durch die Verkehrsstärke bestimmt wird, und dass auch für die Berechnung besonderer Faktoren wie Windeinflüsse auf Binnen- oder küstennahen Gewässern Berechnungsansätze bereitgestellt werden können. Dieser Bemessungsansatz, der von der Arbeitsgruppe als „Konzept-Bemessungs-Methode“ (Konzept-Design-Methode) bezeichnet wurde, kann auf Standardszenarios mit fest definierten Randbedingungen wie Binnenschiffahrtskanäle angewendet werden.

Es gibt jedoch nur wenige Richtlinien, wie beispielsweise die aus Russland oder China, die Informationen über geeignete Abmessungen von Fahrrinnen in Fließgewässern bereitstellen, z. B. die Mindestbreite von Schleusenvorhöfen im Falle von großen Fließgeschwindigkeiten. Da jeder Fluss einzigartige nautische Randbedingungen aufweisen kann, sind beim Vorherrschen besonderer Bedingungen allgemeingültige Empfehlungen oft nicht möglich. Bei ihrem Treffen in Madrid einigte sich die Arbeitsgruppe für diese Fälle auf detaillierte Bemessungsempfehlungen unter Nutzung von Simulationsverfahren oder Naturerhebungen. Eine solche Vorgehensweise erscheint generell vertretbar zu sein, bedenkt man, dass die Kosten detaillierter nautischer Untersuchungen i.d.R. nur einen Bruchteil der Baukosten ausmachen, und dass sich letztere durch eine solche Studie ggf. erheblich reduzieren lassen. Aus diesem Grund wurden die Möglichkeiten und Grenzen moderner Simulationssoftware erörtert – und die erforderlichen Eingangsparameter und zu erwartende Simulationsergebnisse.

Die Festlegung angemessener Standards für die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs ist ein schwieriges Unterfangen. Da sie die Abmessungen von Wasserstraßen erheblich beeinflussen, wurde beschlossen, neben dem Konzept-Design und den fallweisen Untersuchungen auch noch einen Ansatz auf Basis von Erfahrungen (Best-Practice) zu empfehlen. Während der Treffen in Utrecht und Antwerpen wurden umfangreiche Daten zusammengetragen, beispielsweise über die bestehenden Abmessungen von Fahrrinnen oder Schleusenvorhöfen in Fließgewässern. Anhand der Daten wurden die zugehörigen Randbedingungen diskutiert, um vorhandene große Unterschiede zu erklären. Die Idee ist, dass die Anwender dieser „Best-Practice-Methode“ ihre besonderen Randbedingungen mit den vorhandenen Beispielen vergleichen und mit ihrer Hilfe geeignete Abmessungen für ihre jeweiligen Bemessungsfälle finden können. Besteht eine große Bandbreite in den vorhandenen Daten, kann dies den Anwendern als Argument dienen, alternativ oder zusätzlich eine detaillierte Bemessungsstudie durchzuführen.

Das Interimstreffen bei der SMART Rivers Konferenz (nachfolgend kurz als „SRC“ bezeichnet) in Maastricht und das positive Feedback zum dortigen WG 141 Workshop zeigten, dass die Arbeitsgruppe grundsätzlich auf dem richtigen Weg ist, dass aber die oben erwähnten Anmerkungen zu den festgelegten Terms of Reference und zu den Unterschieden im Vergleich zum

MARCOM-Ansatz notwendig sind. Es wurde beschlossen, die Konferenzbeiträge als Grundlage für die zukünftigen Richtlinien der Arbeitsgruppe zu verwenden. Der Workshop zeigte deutlich, dass der 3-Stufen-Ansatz, der in vielen Fällen nur Prozessempfehlungen anstatt konkreter Zahlen bereitstellt, trotzdem sehr hilfreich sein kann, insbesondere um die notwendige Qualität der Fachaussagen aus Fallstudien mit Simulationsverfahren zu gewährleisten. Nichtsdestoweniger verlangten die Teilnehmer des Workshops für die Abmessungen von Wasserstraßen, so viele konkrete Werte wie möglich zu nennen. Allgemeine Zustimmung fand auch der Ansatz, den Anforderungen an die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs dadurch Rechnung zu tragen, dass drei Leichtigkeitskategorien verwendet werden und diese Kategorien den entsprechenden Werten aus dem Konzept-Design zugewiesen werden. Diese Vorgehensweise wurde der Forderung einiger Teilnehmer gerecht, bei den Werten der Leichtigkeitskategorie C „realistischere“ oder allgemein „engere“ Standards als für Seeschiffe festzulegen. Aus der weiteren Diskussion ergab sich allerdings, dass es momentan noch an weiteren verwertbaren Beispielen aus der Praxis fehlt, vor allem für Abmessungen von Fahrrinnen und Schleusenvorhöfen in Flüssen.

Die Ergebnisse der SRC wurden beim 8. Treffen im Februar 2014 in Brüssel überprüft. Dabei bestand in der Arbeitsgruppe weitgehend Einigkeit über die Mindestwassertiefe in Schleusenvorhöfen, die Art der Berücksichtigung einer verbesserten Steuerung durch Bugstrahlruder, die Rücklage von Festmacheinrichtungen in Flüssen mit signifikanten Fließgeschwindigkeiten, die Größe der erf. Sichtweite an Einmündungen sowie über die Art, wie Praxisbeispiele dargestellt werden sollen. Die laufende Diskussion über die Definition angemessener Sicherheits- und Leichtigkeitsstandards mündete in einen modifizierten Ansatz, der hier in Kapitel 5 vorgestellt wird. Zwei neue Kriterien werden berücksichtigt: die Sportschiffahrt und der erreichbare bzw. steuertechnisch notwendige Schiffsgeschwindigkeitsbereich sowie die Vermeidung der Bezeichnungen „Standard“ oder „Niveau“ und ihr Ersatz durch „Kategorie“, „Bewertung“ oder „Qualität“. Da die Sicherheit des Schiffsverkehrs in jedem Fall gewährleistet sein sollte, wurde beschlossen, ausschließlich den Aspekt *Leichtigkeit* des Schiffsverkehrs zu betrachten. Zur Verwendung der SRC-Vorträge im Bericht wurde ebenfalls ein Beschluss gefasst. Die Ausarbeitung eines ersten Berichtentwurfs, der auf diesen Vorträgen und der Zuweisung der neuen Kategorien zu den Werten des Konzept-Designs beruht, wird Aufgabe des 9. Arbeitsgruppentreffens sein.

4. Aktualisierter Allgemeiner Bemessungssatz

4.1 Empfohlene Vorgehensweise

Wie in Kapitel 3 erwähnt, wurde in der Arbeitsgruppe beschlossen, allgemein drei Schritte für die Bemessung zu empfehlen. Nachfolgend werden diese ausführlicher beschrieben. Vor und gegebenenfalls auch nach Durchführung der Bemessung müssen jedoch alle relevanten Bemessungsaspekte festgelegt werden, um mögliche Rückwirkungen auf den Bemessungsfall oder allgemein auf die geplante Ausbaumaßnahme zu berücksichtigen. Der allgemeine Bemessungsprozess ist in Abbildung 1 dargestellt und wird im Folgenden genauer erläutert:

Binnenwasserstraßen

Sachstand der PIANC INCOM WG 141: Bemessungsgrundlage für Binnenwasserstraßen

Nr.	Jahr, Ort	Hauptthema	Wichtigstes Ergebnis
1	2010, Liverpool	Aufgaben der AG, TOR, generelles Vorgehen	Start Sichtung bestehender Richtlinien
2	2010, Karlsruhe	Inhaltsverzeichnis	Primär werden nur Frachtschiffe betrachtet
3	2011, Brüssel	Sammlung von Richtlinien	Definition der Bemessungsschiffe
4	2011, Paris	Review bestehender Richtlinien	Notwendigkeit Sicherheit und Leichtigkeit zu betrachten
I1	2011, Brüssel	Workshop Planung	Praxisbeispiele in Flüssen anstatt Nutzung von Richtlinien
5	2012, Bonn	Fahrrinnen in Kanälen, Brückendurchfahrarbeiten, Wendebecken	Abmessungen für die Konzept-Bemessung-Methode als Vielfaches der Schiffsbreite
I2	2012, Madrid	Anwendung von Schiffsführungssimulatoren	Notwendigkeit detaillierter Fallstudien, speziell für Schleusenvorhöfen
6	2012, Utrecht	Fahrrinne und Wendestellen in Flüssen, Liegestellen	3-stufiger Bemessungsansatz, Praxisbeispiele für die Fahrrinnenbreite in Flüssen
7	2013, Antwerpen	Diskussion über Sicherheit und Leichtigkeit, Schleusenvorhöfen	Abmessungen von Schleusenvorhöfen, Wendebecken im Stillwasser und im Fließgewässer
I3	2013, Maastricht	Workshop Smart Rivers Konferenz („SRC“)	Positive Resonanz für den Bemessungsansatz, insb. zur Definition engerer Standard
8	2014, Brüssel	Ergebnisse Smart Rivers Konferenz 2013, („SRC“)	Entscheidung, die Veröffentlichungen zur SRC als Vorbilder für die Richtlinien zu verwenden

Tabelle 1: Überblick über die Sitzung von WG 141 mit Hauptthemen und Entscheidungen („I“ = Interim)

(1) Zur Klärung des Bemessungsfalls ist zunächst die vorhandene und zukünftige Flotte zu betrachten. Letztere ist unter Beachtung der voraussichtlichen Nutzungsdauer der verkehrswasserbaulichen Maßnahmen festzulegen. Auf dieser Grundlage sind die Bemessungsschiffe mit typischem Tiefgang (in der Regel ein voll abgeladenes und ein leeres bzw. ballastiertes Schiff) und typischer Fixpunkthöhe über dem Wasserspiegel (möglicherweise muss die Zahl der Containerlagen variiert werden) zu definieren. Anschließend sind die relevanten Verkehrssituationen festzulegen, meistens Begegnungsverkehr oder Einzelfahrt der größten Schiffe zu Berg und zu Tal. Dabei sind die Verkehrsstärke und etwaige Wartezeiten vor Engstellen besonders zu beachten. Die von WG 141 zu erarbeitenden künftigen Richtlinien sollten hierfür geeignete Checklisten für wichtige Faktoren und die erforderlichen Daten bereitstellen. Diese Checklisten hängen einerseits davon ab, in welchem Stadium sich die Bemessung gemäß Abbildung 1 befindet, andererseits vom Typ der Wasserstraßenabmessung, die bemessen werden soll, z. B. der Fahrrinnenbreite in einem frei fließenden Gewässer.

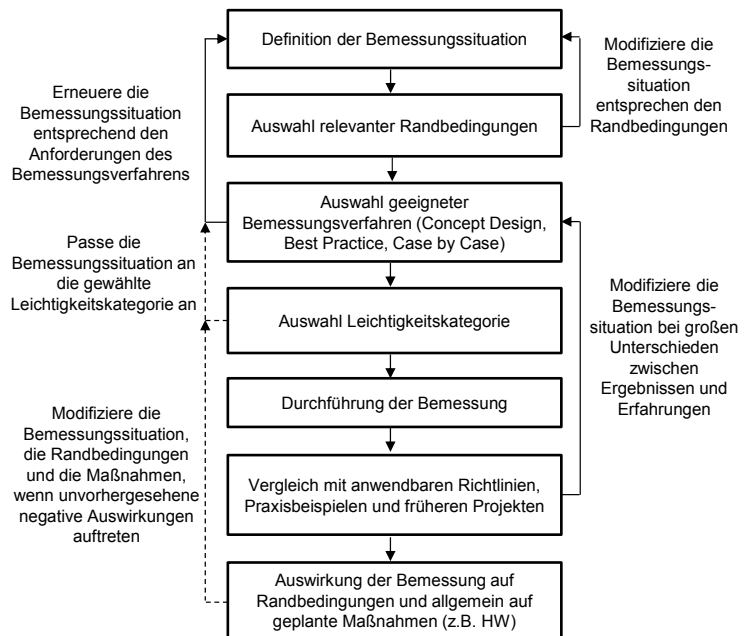


Abbildung 1: Allgemeiner Ansatz und einzelne Schritte bei der Bemessung von Binnenwasserstraßen

Binnenwasserstraßen

Sachstand der PIANC INCOM WG 141: Bemessungsgrundlage für Binnenwasserstraßen

Aspekt	Randbedingungen	Notwendige Daten
Fahrwasserbedingungen	Relevante Wasserstände: Generell Niedrigwasser, Mittelwasser, Wasserstand bei dem volle Abladung erreicht wird (min. Verfügbare Fahrwasserbreite), höchster schiffbarer Wasserstand (größte Schleppflächenbreite, aber größere Fahrwasserbreite), Wasserstand, bei dem Parallelwerke oder Bühnen überströmt werden (Querströmungen) und damit Ufer oder ökol. Sensitive Bereiche belastet werden	Berechnungen oder Messungen (zumindest 2D tiefengemittelt) zum Strömungsfeld mit Wasserständen und zugehörigen Längs- und Quergefällen, Längs- und Querströmungsgeschwindigkeiten, Sohltopografie mit Regelungsbauwerken und Uferböschungen, möglichst auch bei hohen Wasserständen sofern relevant, dann mit Überflutungsbereichen
	Theoretischer und tatsächlicher Fahrrinnenverlauf, Lage von Fahrwassertonnen, Radarmarken, übliche Landmarken zur nautischen Orientierung, übliche Stellen zur Ausführung schwieriger Manöver wie Überholstrecken	Beobachtete Schiffscurse, möglichst mit Schleppflächen, z. B. durch die Analyse von AIS-Daten, Umfrage bei Schiffsführern und Wasserstraßenverwaltungen, ECDIS Wasserstraßenkarten
Beladung und Schiffsgeschwindigkeiten	Wasserstands-abhängige maximale und mittlere Abladetiefen für voll beladene Schiffe, Revierabhängiges Risiko einer Grundberührung	Lokale Abladeregeln an relevanten Bezugspunkten, Sohlbeschaffenheit mit Korngrößen, insbesondere Felsstrecken
	Hydrodynamisch maximal erreichbare (kritische) Schiffsgeschwindigkeit der verschiedenen Schiffe, für verschiedene Beladungen und Wasserstände in jedem relevanten Querprofil als obere Grenzwerte sowie praxisübliche Schiffsgeschwindigkeit und zugehörige eingesetzte Motorleistung	Rückströmungsgeschwindigkeits-relevante (effektive) Querschnittsflächen, inklusive Wasertiefen im Schiffspfad und zugehörige Strömungsgeschwindigkeit
Hydrologie und Wetter	Sichtbedingungen, Windeinfluss	Tage mit Nebel oder Starkwind, Windstatistik, mögliche Windabschattung z. B. durch Bäume
Humanfaktor Schiffsführer	Revierspezifische Erfahrungen, Fähigkeiten, Ausbildungsniveau, mittlere Fahrzeiten im betrachteten Streckenabschnitt mit Abschnitten erhöhter erf. Aufmerksamkeit, Stress, Ablenkung	Strikt vertraulicher Dialog mit Schiffsführern, Umfrage unter Schiffsführern und Wasserstraßenverwaltungen

Tabelle 2: Checkliste (unvollständig) für die Analyse bestehender Fahrrinnenbreiten in einem frei fließenden Gewässer für den Bemessungsschritt „Auswahl relevanter Randbedingungen“ in Abbildung 1

(2) Im nächsten Schritt sind die örtlichen Randbedingungen zu betrachten. Dazu zählen die Wahrscheinlichkeit starker Querwinde und schlechter Sichtverhältnisse wie Nebel, die Variationsbreite mit zugehöriger Eintrittswahrscheinlichkeit unterschiedlicher Wasserstände und die damit verbundenen Fließgeschwindigkeiten, insbesondere Längsströmungen für die Ermittlung von Schleppflächenbreiten von Talfahrern in engen Kurven oder der Stoppweglängen bei der Anfahrt von Schleusenvorhöfen vom Oberwasser her sowie Querströmungen an Einleitungsbauwerken oder im Einfahrtbereich von Schleusenvorhöfen. Auch schiffsinduzierte Sohl- und Uferbelastungen sind zu beachten, insbesondere im Hinblick auf die Uferstabilität (Aspekte Porenwasserüberdruck und Erosion) und auf ökologisch sensible Gebiete, die geschützt werden sollen. Hier müssen möglicherweise größere Mindestuferabstände festgelegt werden als die nautisch erforderlichen Sicherheitsabstände. Falls notwendig, ist der Bemessungsfall an diese Randbedingungen anzupassen. Auch hier sind wieder entsprechenden Checklisten für relevante Faktoren und Daten bereitzustellen. Tabelle 2 enthält ein Beispiel der örtlichen Randbedingungen, die z. B. im Fall einer Analyse der Fahrwasserbedingungen in einem frei fließenden Gewässer zu beachten sind. Auch wenn die Checkliste unvollständig ist, zeigt sie doch die Komplexität des Bemessungsproblems und den teilweise enormen Umfang der benötigten Daten. Eine Vereinfachung des Bemessungsproblems

oder eine Fokussierung auf die für die Bemessung relevanten Randbedingungen ist daher erforderlich.

- (3) Als dritter Schritt wird eine geeignete Bemessungsmethode ausgewählt, z. B. die Anwendung der jeweils gültigen nationalen Richtlinien (Rettemeier 2013), falls sie den betrachteten Bemessungsfall behandeln (in diesem Fall kann der Bemessungsprozess hier enden), oder anderer Richtlinien sofern anwendbar bzw. das hier generell empfohlene 3-stufige Bemessungsverfahren, wobei die im folgenden Kapitel beschriebenen Einschränkungen und Anforderungen zu beachten sind. Wenn nötig, werden die Spezifikationen des Bemessungsfalls und die Randbedingungen gemäß der gewählten Bemessungsmethode überprüft.
- (4) Danach folgt die Auswahl einer geeigneten Leichtigkeitskategorie (Deplaix & Söhngen, 2013, Kap. 5) in Abhängigkeit von Faktoren wie Schiffsgeschwindigkeit und Verkehrsstärke. Der Bemessungsfall ist gegebenenfalls an die Anforderungen der gewählten Kategorie anzupassen.
- (5) Die Durchführung der eigentlichen Bemessung ist der fünfte Schritt. Bei Unklarheit bezüglich der geeigneten Methode sind mehrere Methoden anzuwenden.
- (6) Anschließend wird ein Vergleich der Bemessungsergebnisse (unter Verwendung aller drei empfohlenen Methoden, falls erforderlich) mit Ergebnissen

aus ähnlichen Projekten empfohlen. Sollten große Unterschiede bestehen oder besondere Parameter vorliegen, die sich mehr als erwartet auf die Ergebnisse auswirken, wird für diese Parameter eine Sensitivitätsanalyse empfohlen. In diesen Fällen sind die gewählte(n) Bemessungsmethoden und entsprechenden relevanten Daten zu modifizieren oder verfeinern.

- (7) Abschließend wird geprüft, welche Auswirkungen das erzielte Ergebnis auf den Bemessungsfall, die zu beachtenden Randbedingungen und schließlich die geplanten Baumaßnahmen hat. Hier geht es insbesondere um die Stabilität der Uferböschungen und die Gebäude entlang der Wasserstraße sowie entsprechende Ausgleichsmaßnahmen, mögliche negative Einflüsse auf die Umwelt, Wasserstände (insbesondere Anstieg der Hochwasserstände), Aufwendungen für Ausgleichsmaßnahmen oder unvorhergesehene sozio-ökonomische Folgen, wenn sich z. B. die nautisch erforderlichen Wasserstraßenabmessungen als sehr viel größer erweisen als erwartet. In diesen Fällen müssen die betrachteten Bemessungsszenarios ggf. abgeändert werden, beispielsweise die Verkehrssituation (Richtungsverkehr statt zweisepuriger Verkehrsführung). Diese und ggf. weitere erforderliche Anpassungen des Bemessungsfalls und damit ggf. auch der geplanten Ausbaumaßnahmen sind mit allen am Planungsprozess Beteiligten abzustimmen. Generell ist zu beachten, dass jeder Bemessungsprozess i. d. R. ein geschlossener Kreislauf ist, in dem alle weiter oben und in Abbildung 1 beschriebenen Schritte mehrmals durchlaufen werden müssen. Im Falle einer Planungssituation könnte dies auch neue hydraulische Berechnungen für das Strömungsfeld beinhalten.

4.3 Konzept-Design-Methode

Dieser Bemessungsansatz entspricht grundsätzlich der Vorgehensweise, bei der zutreffende nationale Richtlinien angewendet werden (Rettemeier 2013, Söhngen & Rettemeier 2013b). Letzteren spiegeln die besonderen Anforderungen an die Nutzung von Wasserstraßen und die administrativ gewollte Verbesserung der Infrastruktursituation des jeweiligen Landes wider. Sie berücksichtigen zudem die relevante Schiffsflotte, die Schifffahrtstradition, die politischen und sozioökonomischen Randbedingungen und den nationalen und internationalen Rechtsrahmen, der zu beachten ist. Nationale Richtlinien entsprechen daher den allgemein anerkannten Wasserstraßenstandards und der Best Practice im betreffenden Land und sind somit erste Wahl im Bemessungsverfahren. Doch die Anwendung dieser Richtlinien löst nicht immer alle Bemessungsprobleme. Neben den allgemeinen Anwendungseinschränkungen, die für die meisten Richtlinien gelten, können notwendige Festlegungen fehlen, wie z. B. Angaben zur Fahrrinnenbemessung in Flüssen mit hohen Fließgeschwindigkeiten (Söhngen & Rettemeier, 2013a). Ein weiterer Nachteil nationaler Richtlinien besteht häufig darin, dass sie erst spät an neue Entwicklungen wie z.B. Veränderungen der Flottenzusammensetzung angepasst werden. Aus diesem Grund entsprechen sie manchmal nicht der aktuellen Situation und können notwendige Weiterentwicklungen behindern oder aufhalten. Außerdem werden, wie bereits erwähnt, in der

Regel nicht alle relevanten Bemessungsaspekte von den Richtlinien abgedeckt. Dies kann das Spektrum möglicher Innovationen einschränken und sich als Hürde erweisen, wenn Lösungen an unterschiedliche Randbedingungen vor Ort angepasst werden sollen.

Doch selbst die Anwendung nicht nur nationaler, sondern geeignet erscheinender internationaler Richtlinien hilft nicht immer weiter, z.B. solche von China oder den USA, denn es gibt bei der Bemessung der Fahrrinnenbreite, um bei demselben Beispiel zu bleiben, teilweise extreme Unterschiede bei den empfohlenen Abmessungen in besonderen Fällen, beispielsweise betreffend die Länge von Schleusenvorhöfen. Die Ursache dafür können unterschiedliche Anforderungen an die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs oder verschiedene Schiffstypen sein, um nur zwei Aspekte zu nennen. In vielen Fällen ist also die Anwendung vorhandener Richtlinien für die Lösung des Bemessungsproblems nicht ausreichend.

Deshalb empfiehlt WG 141

- In einem ersten Schritt die Sichtung der nationalen Richtlinien, um alle Bemessungsszenarien zu erfassen, die von diesen Richtlinien abgedeckt werden,
- den Vergleich dieser mit zutreffenden internationalen Richtlinien, um einen Eindruck zu gewinnen, wie hoch die Unsicherheit bezüglich der geforderten Abmessungen für Wasserstraßen ist,
- des Weiteren einen Vergleich mit den von WG 141 aus den bestehenden Richtlinien extrahierten Bemessungswerten der Konzept-Bemessungsmethode (Rettemeier 2013),
- die Verwendung der entsprechenden Empfehlungen von WG 141 für besondere Bemessungsszenarien als erforderliche Mindestwerte für die Breiten und Tiefen von Kanälen, Brückenöffnungsbreiten, Längen und Breiten von Schleusenvorhöfen, den Durchmesser von Wendeböden oder Länge und Zurücklage von Festmacheinrichtungen und abschließend
- die Erweiterung der Bemessung, falls erforderlich, durch Nutzung geeigneter Formeln aus geltenden Richtlinien oder relevanten Publikationen für Zusätze zum Basiswert der Bemessung, z. B. für die Zusatzbreite in Kurven bei großen Fließgeschwindigkeiten oder um Querströmungen oder Windeinflüssen (Abb. 2) entgegenzuwirken.

Dieser umfassendere Konzept-Design-Ansatz wurde im Workshop während der Smart Rivers Conference 2013 vorgestellt (Söhngen & Rettemeier, 2013a, 2013b, Eloit et al. 2013). Zur Unterstützung eines Verkehrssimulationsmodells für Flüsse, das hinsichtlich der Fahrdynamik aus Rechenzeitgründen vereinfachte Ansätze verwendet, wurden zusätzliche Formeln z. B. zur Berücksichtigung der Zusatzbreiten in Kurven bei starker Strömung oder der allgemeinen Instabilität des Schiffs-kurses, den Einflüssen des „human factor“ (nachfolgend „Humanfaktor“) und der Fahrt in Buhennähe abgeleitet (VBW 2013, Fischer et al. 2014). Diese Formeln können auch zur Verbesserung der Konzept-Design-Methode verwendet werden. Sie sind jedoch auch bei der

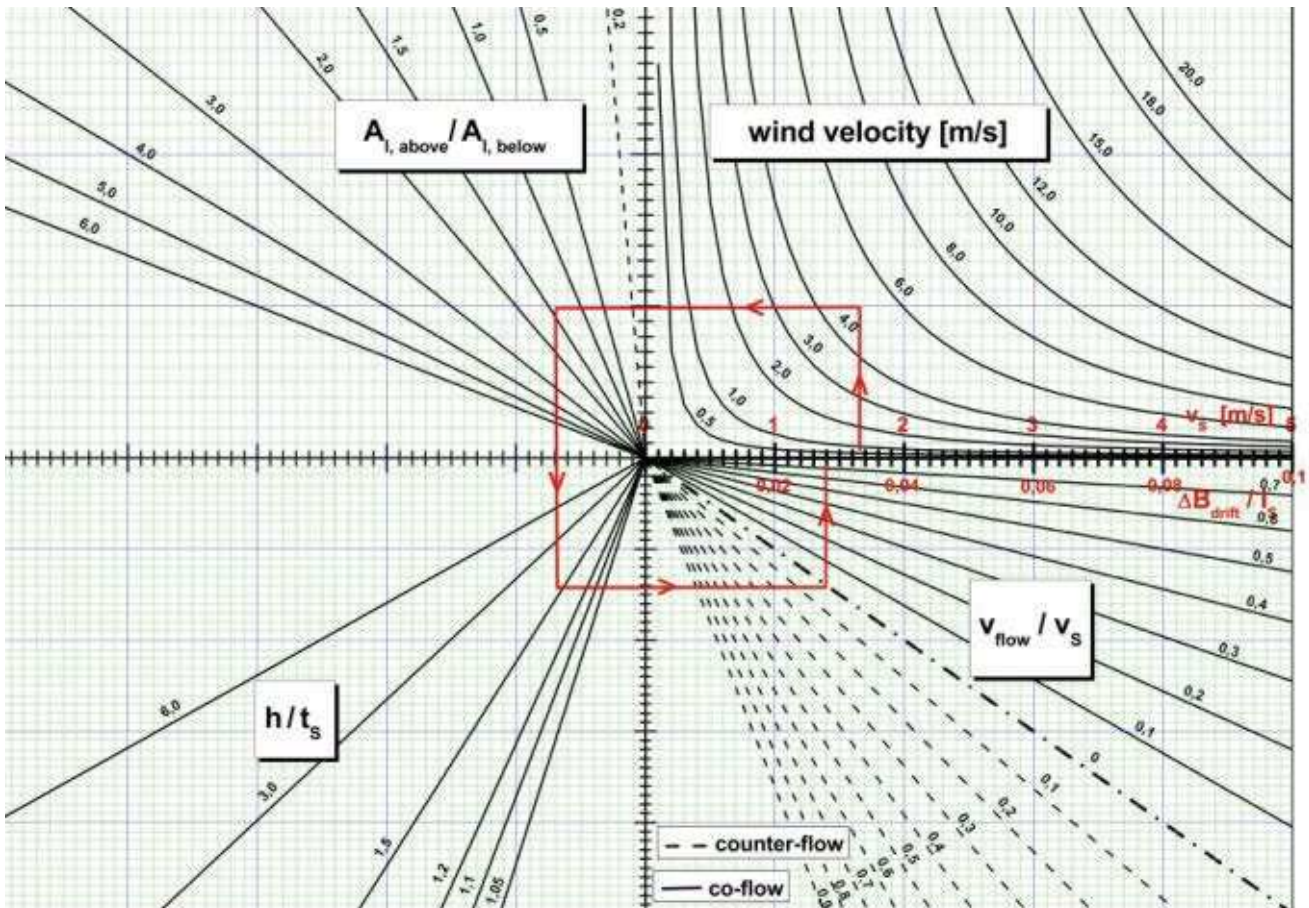


Abbildung 2: Diagramm zur Einschätzung des Querwind-Einflusses auf ein Schiff der Wasserstraßenklasse Va

detaillierten Bemessung hilfreich, z. B. um den Bemessungsfall zu präzisieren. So ist beispielsweise die Durchführung von Simulationen aller möglicherweise relevanten Windrichtungen und -geschwindigkeiten mit hohen Kosten verbunden. Es ist effizienter, stattdessen relevante Windsituationen zu bestimmen. Für diesen Zweck gibt es allgemein bekannte Formeln zur Berechnung der Querkräfte und Momente auf das Schiff aufgrund des Windangriffs, denen der eingetauchte Schiffskörper des Schiffes z. B. durch Einnahme eines Driftwinkels entgegenwirken muss. Mit diesen Formeln lassen sich die zugehörigen Zusatzbreiten in guter Näherung berechnen. Diese Vorgehensweise wurde für das Bemessungsdiagramm in Abbildung 2 gewählt. Dabei wurden die Randbedingungen des Havel-Oder-Kanals (HOW) verwendet. Das Diagramm gilt für Schiffe der Klasse Va ohne Bugstrahlruder und kann zusammen mit den Daten über vorhandene Fahrrinnenbreiten verwendet werden, um z. B. die zulässige Windgeschwindigkeit für Sondertransporte festzulegen, da der HOW nur für Fahrzeuge der Klasse IV bemessen ist. Wenn also eine Detailstudie mit einem Schiffsführungssimulator geplant ist, z. B. zur Klärung der Bedingungen für die Zulassung von Sondertransporten auf einem Kanal, kann im Vorfeld geprüft werden, ob der Windeinfluss von Bedeutung ist oder die relevante Windsituation eingegrenzt werden kann. Dies reduziert die erforderliche Anzahl von Fahrten im Simulator. Im Zusammenhang mit diesem Bemessungsaspekt soll der Ansatz für Abbildung 2 für den zukünftigen Bericht von WG 141 vereinfacht und mit den niederländischen Richtlinien für Kanäle, die Zusatzbreiten bei Windeinfluss angeben, verglichen und ggf. modifiziert werden.

4.4 Bemessung nach Erfahrung

Die vorhandenen Richtlinien liefern nur wenige Informationen über die Wasserstraßenabmessungen in Flüssen. Dies betrifft z. B. die Abmessungen von Schleusenvorhöfen oder die erforderlichen Fahrrinnenbreiten in Flüssen. Zur Bemessung einer neuen Schleuse oder der Anpassung eines vorhandenen Schleusenvorhafens an größere Schiffe (wie am Neckar, deren Schleusen derzeit nur von 105 m langen Schiffe befahren werden können, die aber für Schiffe mit einer Länge von bis zu 135 m ausgebaut werden), stellen bestehende Richtlinien nur wenige Informationen darüber bereit, wie die erforderliche Länge (von der Spitze der Mole bis zur Schleuseneinfahrt) und Einfahrtsbreite des oberen und unteren Schleusenvorhafens z. B. an Schiffe mit größeren Abmessungen bei großen Fließgeschwindigkeiten vergrößert werden müssen. Solche Längen- und ggf. auch Breiterweiterungen sind generell angezeigt, insbesondere weil im Vorhafenbereich bei starken Querströmungen der Flächenbedarf längerer Schiffe größer ist als der der heutigen Flotte und weil eine leichte Ein- und Ausfahrt nur bei entsprechen langen Vorhöfen möglich ist, in denen keine signifikanten Strömungen vorliegen. Die Informationslücken lassen sich jedoch mithilfe von Praxisbeispielen für Schleusenvorhöfen in Flüssen schließen. Dafür gilt es, Beispiele zu identifizieren, die mit der betrachteten ggf. einzigartigen Bemessungssituation vergleichbar sind (Koedijk 2013). Problematisch ist dabei, dass sich die Randbedingungen ausgeführter Verkehrswasserbauwerke wie von Schleusen in Fließgewässern von Fall zu Fall stark unterscheiden können,

besonders in Bezug auf die vorhandenen Längenabmessungen von Vorhäfen. Beispiele dafür sind der Main und der Neckar: Die Konstruktionslänge der Vorhäfen beträgt zwischen $0,7$ und $2,0 \cdot L$ (L = Länge des Bemessungsschiffes) auf dem Neckar; der durchschnittliche Wert liegt bei $1,5 \cdot L$. Die oberen Vorhäfen am Main sind hingegen in der Regel länger: von $1,4$ bis $4,2 \cdot L$, der Durchschnittswert liegt etwa bei $2,5 \cdot L$. Es sind kaum zwingende technische Gründe erkennbar, die die großen Längenunterschiede erklären könnten. Vielmehr ist anzunehmen, dass die Planer versucht haben, den verfügbaren Raum größtmöglich auszunutzen, um die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs zu optimieren. Wenn dagegen größere Abmessungen nicht möglich waren, wurde offensichtlich ein geringerer Standard akzeptiert.

Eine weitere wichtige Erkenntnis aus der großen Spanne ausgeführter Längen von Schleusenvorhäfen ist, dass ein sicherer Schiffsverkehr immer noch möglich scheint, selbst bei den sehr knapp dimensionierten Schleusenvorhäfen an deutschen Flüssen oder bei den eingeschränkten Fahrrinnenbreiten des frei fließenden Oberrheins oder des Mains. Dies mag auf die sehr restriktiven Zulassungsbedingungen für die entsprechenden Schiffe zurückzuführen sein, die u. a. effiziente aktive Bugrudernanlagen verlangen. Hierzu wird auf die beiden folgenden Grafiken verwiesen. In ihnen wird in Analogie zu Angaben der Konzept-Design-Methode für Kanäle, bei denen die erf. Fahrrinnenbreite als Vielfaches der Schiffsbreite angegeben ist, das Verhältnis der vorhandenen (ausgetonnten) Fahrrinnenbreite b_F zur Breite B der größten Schiffe (Ordinate) an typischen Breitenengpässen über einem Parameter aus der Theorie der Zusatzbreiten in Kurven (Abszisse) aufgetragen. Die Abbildungen zeigen große Unterschiede der o. g. Verhältniswerte. Der niedrigste Wert entspricht den engsten Abmessungen am Oberrhein und Main und die größten dem Niederrhein. Doch selbst bei sehr niedrigen Werten auf geraden Abschnitten von etwa $3 B$ für den Richtungsverkehr und $3 B$ bis $4 B$ für den zweisepurigen Verkehr ist klar, dass diese Fahrrinnenbedingungen keine leichte Fahrt ermöglichen. Wahrscheinlich sind ein hohes Aufmerksamkeitsniveau und der Einsatz aller verfügbaren navigatorischen Mittel notwendig, um die Engstellen sicher zu passieren.

Die meisten Werte für b_F/B in den Abbildungen 3 und 4 sind größer als die Zahlen für Kanäle. Letztere liegen bei etwa 2 für die größten Schiffe im einspurigen Verkehr in kleinen Kanälen und bei 3 bis 4 für den zweisepurigen Verkehr (ohne Zusatzbreiten für Kurvenfahrt und Wind) in engen oder „normalen“ Kanälen (Söhngen und Rettmeier 2013b). Dies bedeutet, dass die schiffbare Breite in Flüssen größer sein muss als in Kanälen, u. a. auch aufgrund der stärkeren Einflüsse von Querströmungen, Turbulenz und Wind. Außerdem ist die Orientierung in Flüssen allgemein schlechter als in Kanälen, die über klare Uferlinien verfügen. Als weiterer Unterschied zwischen Kanälen und Flüssen ist zu beachten, dass die Daten zu Kanälen auch Angaben zu Sicherheitsabständen zum Ufer beinhalten, während dies bei den oben diskutierten Fahrrinnendaten von Flüssen nicht immer der Fall ist. Die nautisch nutzbare Fahrwasserbreite ist meist größer als die „offizielle“ Fahrrinnenbreite. Aus den Abbildungen 3 und 4 lässt sich noch eine weitere wichtige Schlussfolgerung ziehen: die Krümmung des Flusses hat einen signifikanten Einfluss auf die erforderliche Fahrrinnenbreite. Das zeigt sich

sogar in Fällen konstanter Fahrrinnenbreiten über lange Abschnitte wie z.B. am Rhein. Die zugelassenen Schiffe, die eine enge Kurve wie z.B. im Abschnitt des Mittelrheins im Bereich des Loreleyfelsen passieren dürfen, sind kleiner als in mehr oder weniger geraden Flussabschnitten. Zu beachten ist, dass die Auswertung der Praxisdaten in WG 141 noch nicht abgeschlossen ist. Auch müssen andere Daten wie vom Jangtse in China, von der Rhône in Frankreich oder vom Mississippi in den USA entsprechend verarbeitet werden.

4.5 Detaillierte Bemessung

Die v. g. Beispiele verschiedener ausgeführter Vorhafenlängen oder Fahrrinnenbreiten verdeutlichen die Unsicherheit bei der Empfehlung angemessener Wasserstraßenabmessungen. Wenn die Varianz der Angaben aus verschiedenen Richtlinien oder (Best-)Praxis-Beispielen zu groß ist, hilft auch eine noch so große Anzahl verfügbarer Informationen nicht weiter. Es ist vielmehr notwendig, eine detaillierte Studie für den betrachteten Bemessungsfall durchzuführen. In Tabelle 3 sind Kriterien aufgelistet, um zu entscheiden, ob eine detaillierte Studie (linke Spalte) notwendig ist und in welchen Fällen die Nutzung numerischer Simulationsverfahren (rechte Spalte) angezeigt ist.

Doch selbst die besten verfügbaren Simulationstechniken können nicht alle Bemessungsfragen befriedigend beantworten, denn auch sie sind nur eine *Annäherung* an die Realität und nicht die Realität selbst. Mit anderen Worten, Modellierungsungenauigkeiten lassen sich generell nicht vermeiden, und sie können erhebliche Auswirkungen auf die Bemessung haben, besonders in Fällen, in denen schiffsinduzierte Strömungen und Wasserspiegeländerungen vorherrschen und das Verhalten des Schiffes beeinflussen wie z. B. bei Fahrt in Ufernähe. Aus diesem Grund empfiehlt die WG 141 adäquate Prozessempfehlungen zur Verwendung von Simulationsverfahren.

Solche Prozessempfehlungen sollten folgende Punkte umfassen

- Klärung, ob eine detaillierte Studie und die Verwendung von Simulationstechnik erforderlich sind.
- Auswahl der geeigneten Untersuchungsmethode (Schiffsführungssimulator mit nachgebildeter Schiffsbrücke, bei dem ein Mensch das Schiff steuert; Fast-Time-Simulation, bei der ein virtueller Schiffsführer, d.h. ein numerisches Bahnführungssystem das Schiff steuert; Verkehrssimulationen, die mit vereinfachten fahrdynamischen Ansätzen arbeiten und bei denen alle am Verkehr beteiligten Schiffe virtuell gesteuert werden oder Untersuchungen mit maßstäblichen, physikalischen Schiffsmodellen).
- Auswahl, Erfassung und problemorientierte Aufbereitung der erforderlichen Daten zur Gewässertopografie mit Bauwerken und dem Strömungsfeld sowie Kalibrierungsdaten, insbesondere für die Bemessungsschiffe.
- Kalibrierung der Strömungsmodelle und der fahrdynamischen Parameter der Bemessungsschiffe unter Nutzung von Fahrversuchen aus Naturuntersuchungen oder Maßstabsmodellen; anschließender Vergleich dieser Daten mit Simulationsergebnissen

Binnenwasserstraßen

Sachstand der PIANC INCOM WG 141: Bemessungsgrundlage für Binnenwasserstraßen

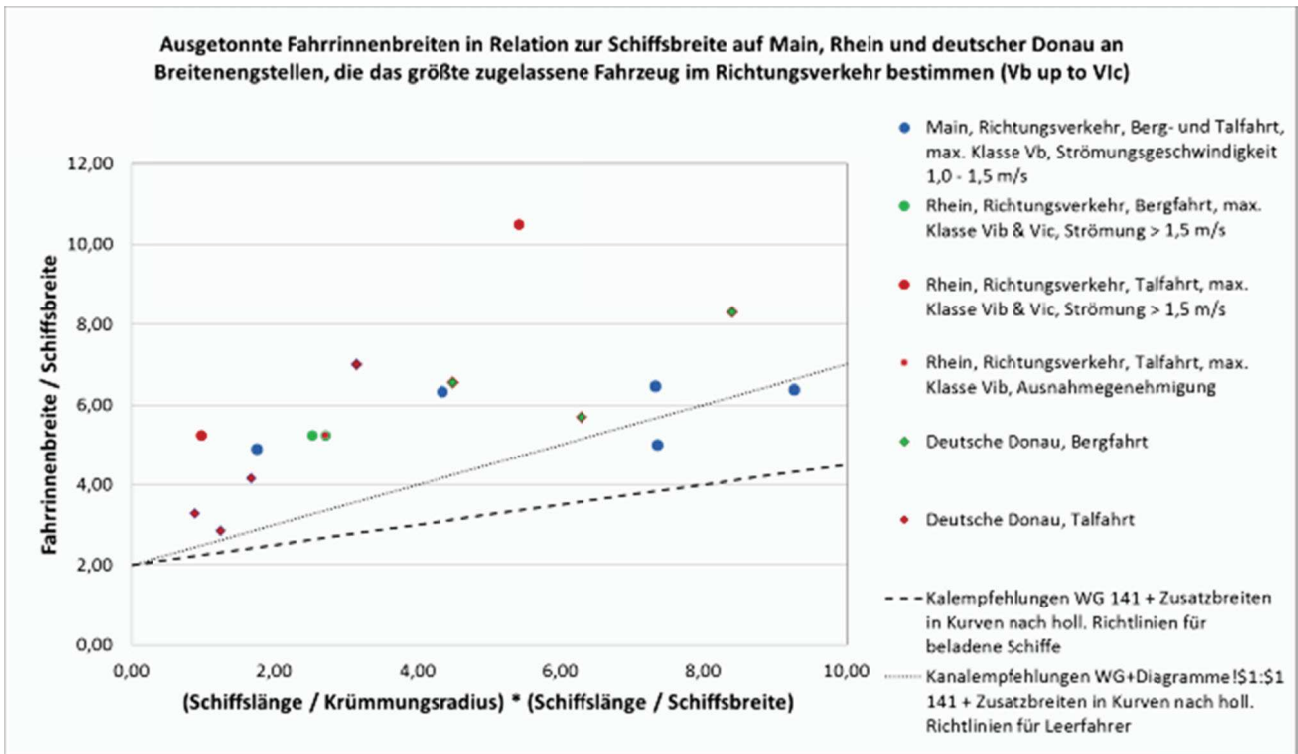


Abbildung 3: Relative ausgetonnte Fahrrinnenbreiten deutscher Flüsse für Richtungsverkehr an Breitenengstellen im Vergleich zu Ansätzen für Kanäle

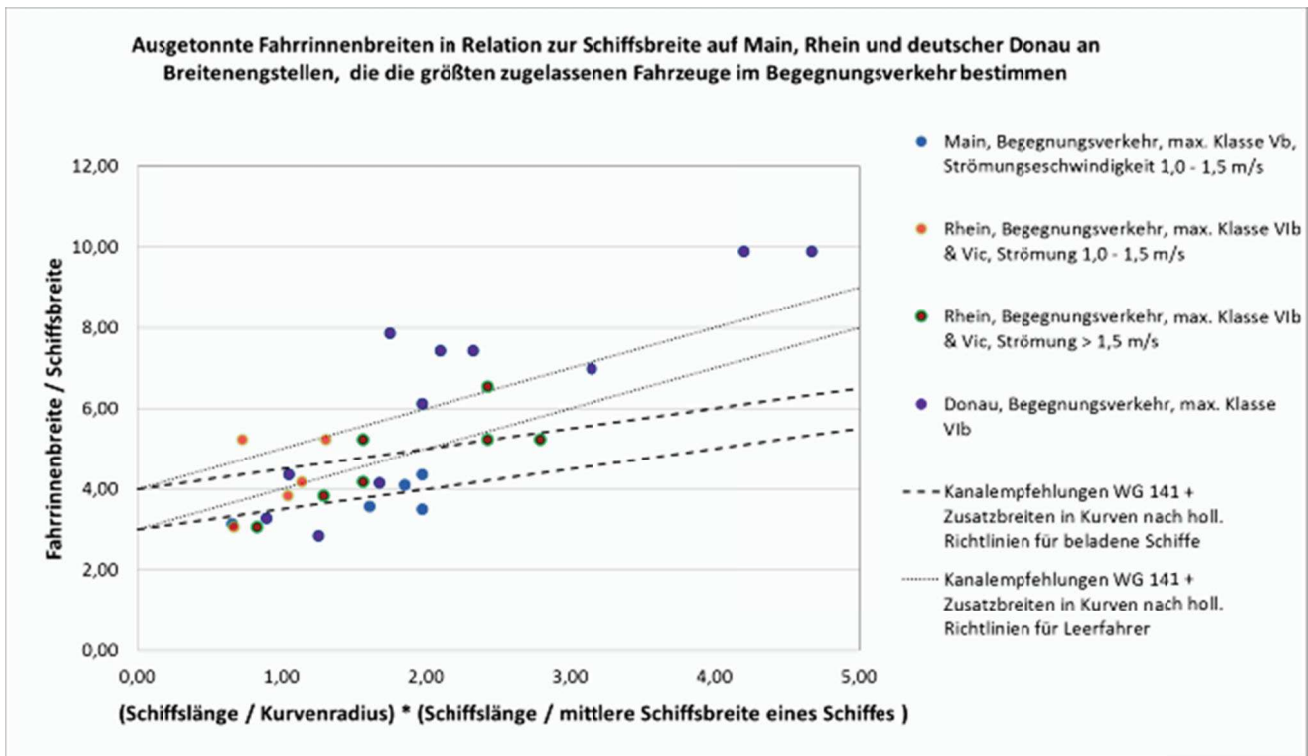


Abbildung 4: Relative ausgetonnte Fahrrinnenbreiten deutscher Flüsse für Begegnungsverkehr an Breitenengstellen im Vergleich zu Ansätzen für Kanäle

Binnenwasserstraßen

Sachstand der PIANC INCOM WG 141: Bemessungsgrundlage für Binnenwasserstraßen

möglichst unter den gleichen Bedingungen wie beim Bemessungsfall.

- Modellvalidierung durch mehrere Durchläufe zum Vergleich mit Messdaten, die nicht für die Kalibrierung verwendet wurden.
- Simulationen, insbesondere im Hinblick auf Einflüsse des Humanfaktors. Die Fahrten im Simulator sollten hierzu möglichst mehrfach und von verschiedenen Schiffsführern mit unterschiedlichen Fähigkeiten, Erfahrungen und körperlichen Fitnessbedingungen ausgeführt werden, wobei ein möglichst großes Kollektiv von Ergebnissen entsteht, das statistisch ausgewertet werden kann, um Zufallseffekte zu berücksichtigen.
- Durchführung von Sensitivitätsanalysen für kritische Bemessungsparameter.
- Statistische Auswertung und Interpretation der Ergebnisse, vor allem zum Humanfaktor.
- Realistische Einschätzung und Kommunikation der Anwendungsgrenzen und unvermeidlichen Unsicherheiten der eingesetzten Simulationstechnik sowie der entsprechenden Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse und folglich die darauf aufbauenden Bemessungsentscheidungen.

Dieser Ansatz ist sicherlich ein kritischer Punkt in den zukünftigen Empfehlungen von WG 141: Insbesondere die Anbieter und Anwender von Schiffsführungssimulatoren neigen dazu, die Anwendbarkeit von Simulatoren zu überschätzen, so wie Kunden, die eine Navigationsstudie in Auftrag geben, dazu neigen, die echte Realität und die virtuelle Realität im Simulator zu vermischen. Die Arbeitsgruppe sieht es deshalb als notwendig an, für den Einsatz von Simulationsverfahren Hilfestellungen in der Form der oben aufgeführten Empfehlungen anzubieten, insbesondere, um die Grenzen des Einsatzes von Standard-Schiffsführungssimulatoren zu berücksichtigen (siehe Tabelle 4). Allgemein lässt sich sagen, dass die Anwendungsgrenzen von Standard-Schiffsführungssimulatoren derzeit dann erreicht sind, wenn starke schiffsinduzierte Strömungen vorliegen und der vom Schiff induzierte Wasserspiegelabsenkung signifikante Auswirkungen auf das Gewässer und die anderen Schiffe hat. In den kommenden Jahrzehnten sind Weiterentwicklungen zu erwarten, die es erlauben sollten, schiffsinduzierte Strömungen und Wellen gleichzeitig mit den Schiffsbewegungen zu simulieren, wodurch sich die Anwendungsgrenzen erweitern.

Die in Tabelle 4 aufgeführten Anwendungsgrenzen bedeuten nicht, dass Schiffsführungssimulatoren in

Notwendigkeit zur Durchführung detaillierter Untersuchungen zur Bemessung der Wasserstraßeninfrastruktur	Notwendigkeit numerische Schiffssimulationsverfahren wie Schiffsführungssimulatoren anzuwenden
Das Dimensionierungsproblem liegt außerhalb des Anwendungsbereiches bestehender Richtlinien und des Erfahrungswissens	Das Schiff hat ungewöhnliche Eigenschaften, z.B. hinsichtlich der Propulsionsorgane, der Steuerung etc.
Schwierige Fahrwasserbedingungen wie scharfe oder mehrere aufeinander folgende Kurven, enges Fahrwasser mit variablen Tiefen, Einmündungen von Flüssen, Kanalkreuzungen, An- und Abfahrt zu Schleusenvorhöfen bei signifikanten Strömungsgeschwindigkeiten, geringe Brückendurchfahrtsbreiten, Wenden oder Anlegen im Strom	Große Differenz zwischen vorhandener und erforderlicher Fahrwasserbreite
Umweltbedingungen spielen eine bedeutende Rolle, z.B. starke, variable oder hoch turbulente Längs- und Querströmungen, schlechte Sicht, kurzzeitige Wasserstandsschwankungen	Möglichkeit zur signifikanten Reduktion der Baukosten erscheint möglich durch nautische Optimierung des Designs
Untersuchungen zum Ausloten der Befahrbarkeitsgrenzen oder zur Akzeptierung höherer Befahrbarkeitsgrenzen, z.B. Anhebung des HSW	Evaluierung von Risiken des Designs und Verkehrsmanagement
Zweifel über die Auswirkungen bei niedrigeren Standards	Ausbildung von Schiffsführern, um bestimmte Standards zu erfüllen
Großer Einfluss des Humanfaktor auf das Design	Veranschaulichung und Demonstration der nautischen Auswirkungen des Designs
Berücksichtigung hoher Verkehrsstärken	Berücksichtigung von Sonderverkehren, z.B. großen Anzahl von Sportbooten
Planung und Überprüfung von Navigationshilfen auf Wirksamkeit	Äkzeptanzfindung für nautische Anforderungen

Tabelle 3: Kriterien, die für eine detaillierte Studie (linke Spalte) und die Nutzung von Schiffsführungssimulationstechnik (rechte Spalte) im Bemessungsprozess sprechen

Starke Interaktionskräfte (Schiff-Ufer oder Schiff-Schiff) wie in engen Kanälen
Starke Flachwasser- oder Kanaleffekte, insbesondere bei Überholungen
Starke Rauheitseffekte, z.B. auf die Querkraft von Bugrudern bei kleinem Flottwasser
Unregelmäßiger Uferverlauf bei ufernaher Fahrt wie bei Bühnen
Starke Wasserspiegelneigungen in Längs- oder Querrichtung
Fahrt innerhalb von Schleusen
Spezielle Probleme wie das Ansaugen von Steinen in Schiffspropeller, schiffsinduzierter Sedimenttransport einschließlich Trübung, der im Bemessungsfall vermieden werden soll

Tabelle 4: Derzeitige Anwendungsgrenzen typischer Schiffsführungssimulatoren

diesen Fällen vollständig versagen würden. Sie können dennoch verwendet werden, wenn sie mit der nötigen Vorsicht interpretiert und möglichst *vergleichend* genutzt werden, wie dies bei hydraulischen Flussmodellen Standard ist. Diese vergleichende Anwendung von Simulationsverfahren ist in Tabelle 5 ausführlicher beschrieben. Sie zeigt, dass es möglich ist, die Anwendbarkeit von Schiffsführungssimulatoren zu erweitern. Dies liegt darin begründet, dass sich Modellfehler bei vergleichenden Betrachtungen teilweise eliminieren, wenn also nicht die *absolute* Größe, sondern der *Unterschied*, z. B. zwischen dem simulierten Verkehrsflächenbedarf zweier betrachteter Szenarien oder Ausbauprodukten, das Ziel der Untersuchung ist. Die Notwendigkeit der vergleichenden Betrachtung bei Anwendung von Simulationsverfahren ist einer der Gründe, warum INCOM WG 141 Prozessempfehlungen für die optimale Nutzung von Schiffsführungssimulatoren zu Zwecken der Bemessung von Binnenwasserstraßen bereitstellen wird. Entsprechende Hinweise finden sich auch im Bericht der MARCOM WG 49.

Zu beachten ist weiter, dass eine fallweise Bemessung im Widerspruch zu den Anforderungen der Standardisierung der Wasserstraßeninfrastruktur stehen kann.

Unterscheide für alle Szenarien oder Varianten stets die folgenden beiden Fälle:

Referenzfall: Dies kann die Befahrung der Wasserstraße im IST-Zustand sein oder eine andere bekannte Fahrsituation, die hinsichtlich der wichtigsten Randbedingungen z.B. der Wassertiefe, der Strömungsgeschwindigkeiten, des Windeinflusses, des Schiffstyps, des Tiefgangs usw. mit dem Bemessungsfall vergleichbar ist und für den qualitativ gute Daten verfügbar sind, z.B. aus Naturuntersuchungen, die im günstigsten Fall sogar derselben Leichtigkeitskategorie zuzuordnen sind wie im Bemessungsfall, indem z.B. die Daten des Referenzfalls von einem kleineren Schiff verwendet werden als im Bemessungsfall, wenn dieses kleinere Schiff im IST-Zustand unter vergleichbaren Fahrwasserbedingungen verkehrt wie das größere Schiff im Ausbaufall

Bemessungsfall (Design-Fall): Er entspricht der für die Auslegung der Wasserstraßen eigentlich interessierenden Fahrsituation, wobei alle relevanten Randbedingungen zu berücksichtigen sind wie die Gewässertopografie, das Strömungsfeld, das Bemessungsschiff, den Schiffsführer mit seinem üblichen, also ggf. in der Praxis nicht immer optimalen Ausbildungsstand, einem häufig in der Fahrpraxis geringen Aufmerksamkeitsniveau usw., um zu berücksichtigen, dass die Realität anders sein kann als die Bedingungen im Simulator mit i.d.R. gut ausgebildeten und hoch aufmerksamen Schiffsführern.

Führe die Simulationen für die Randbedingungen im *Referenzfall* zunächst durch und vergleiche sie mit den verfügbaren Daten des Referenzfalls, insbesondere hinsichtlich der im späteren Bemessungsfall relevanten Aspekte, z.B. der tatsächlich genutzten Fahrwasserbreite oder der Einschätzung der Schiffsführer zur Sicherheit und Leichtigkeit der im Simulator nachvollzogenen Fahrsituation des Referenzfalls. Wenn sich große Unterschiede zu den verfügbaren Daten im Referenzfall oder der Erfahrungen aus dem Referenzfall zeigen sollten, ist die Ursache zu ergründen, indem z.B. die Kalibrierung der verwendeten Modelle überprüft und ggf. verbessert wird, indem nach bisher unberücksichtigten Effekten gesucht wird wie unterschiedliche Fähigkeiten und Aufmerksamkeitsniveaus der Schiffsführer im Simulator und in der Fahrpraxis, indem Ungenauigkeiten in den verfügbaren Daten identifiziert werden oder indem die Sichtbedingungen im Simulator und im Referenzfall verglichen werden. Wenn die Differenzen zwischen Realität und Simulationsergebnissen im Referenzfall akzeptabel erscheinen, kann die grundsätzliche Eignung des Simulators für die betrachtete Fahrsituation angenommen werden. Man beachte aber, dass die gleichen verbleibenden Differenzen auch im Bemessungsfall zu erwarten sind.

Führe nun die Simulationen im Bemessungsfall durch und addiere die Differenzen zwischen Simulationen und verfügbaren Daten im Referenzfall. Diese korrigierten Simulationsergebnisse sind der Realität näher als die unveränderten Ergebnisse der Fahrten im Simulator.

Nutze möglichst objektive Kriterien zur Einschätzung des Schwierigkeitsgrades einer Fahrsituation wie die Anzahl der Ruderimpulse pro Minute, die größten genutzten Ruderwinkel, der Ausnutzungsgrad der verfügbaren Antriebsleistung, die Gesamtzeit zur Durchführung von Manövern, den Verkehrsflächenbedarf, der kleinste Abstand zwischen den beteiligten Schiffen oder zu Bauwerken an und in der Wasserstraße sowie zum Ufer. Die zugehörigen Kennwerte können zum Vergleich des simulierten zum realen Referenzfalls genutzt werden und später zur Korrektur des Bemessungsfalls verwendet werden, aber auch zum Vergleich zweier simulierter Bemessungsfälle, die z.B. zwei verschiedenen Ausbauparametern zugeordnet sind. Die Nutzung dieser Kennwerte erscheint objektiver als zu versuchen, die subjektive Einschätzung der Schiffsführer, trotz ihrer generellen Wertigkeit zur Beurteilung der Fahrwasserhältnisse, z.B. bei einem kritischen Fahrmanöver mit Worten zu beschreiben und dadurch einzuordnen. Beachte, dass es im Allgemeinen nicht ausreicht, dass der Schiffsführer "fühlt", dass die Simulationen korrekt seien, z.B. hinsichtlich der Fahrdynamik seines Schiffes, weil sein „Gefühl“ trügen kann.

Tabelle 5: Minimierung von Modellierungsungenauigkeiten bei der Anwendung von Schiffsführungssimulatoren zur Wasserstraßenbemessung durch vergleichende Betrachtungen

Die Standardisierung soll Bemessungsprozesse vereinfachen, bewährte und nachhaltige Lösungen unterstützen und somit Bau- und vor allem Unterhaltungskosten reduzieren. Eine fallweise Betrachtung sollte also immer die Anforderungen einer Standardisierung beachten und sich ggf. darauf beschränken, die Anwendung von Standardlösungen in solchen Bemessungsfällen, die weit über das Bekannte oder die bisherige Erfahrung hinausgehen, zu überprüfen.

5. Aktualisierter Ansatz zur Bewertung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs

5.1 Gründe für die Definition neuer Leichtigkeitskategorien

Die Unterschiede zwischen den bestehenden und den in nationalen Richtlinien empfohlenen Abmessungen von Wasserstraßen liegen möglicherweise in der Tatsache begründet, dass jedes Wasserstraßensystem mit seinen spezifischen Eigenschaften – vornehmlich Was-

sertiefe und -breite, Fließgeschwindigkeit, durchschnittliche Transportwege, wirtschaftliche Bedingungen der Binnenschifffahrt, Art der transportierten Ladung und Schifffahrtstradition – eine einzigartige Flotte hervorbringt, von der die für die Wasserstraßeninfrastruktur zulässigen Mindestabmessungen abgeleitet werden können. Daher sind die Fahrwasserhältnisse und somit die Bedingungen für die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt definitiv von Land zu Land und von Wasserstraße zu Wasserstraße unterschiedlich. Dennoch sollte zumindest die Sicherheit des Schiffsverkehrs in jedem Fall gewährleistet sein. Daher beschloss WG 141, sich auf die Differenzierung von *Leichtigkeitskategorien* zu beschränken und man geht davon aus, dass die Sicherheitsanforderungen im Rahmen der Zulassung und Konstruktion erfüllt werden. Es gibt jedoch einige objektive Kriterien, die für eine großzügigere Bemessung der Wasserstraßen sprechen, z. B. wenn im Schadensfall ein hohes Risiko für Leib und Leben besteht. In anderen Fällen wiederum können niedrigere Standards vertretbar erscheinen, beispielsweise in engen Kanälen mit geringer nutzbarer oder möglicher Schiffsgeschwindigkeit. Diese Kriterien werden in Kapitel 5.2 erläutert.

Auf der Grundlage der vorliegenden Kriterien werden verschiedene „Kategorien“, „Bewertungen“ oder „Grade“ der Leichtigkeit definiert. Diesen neuen Begriffen ging in WG 141 eine lange Diskussion um die richtige Begrifflichkeit voraus. Sie lösen die Begriffe „Standard“ und „Niveau“ ab, die vor dem 8. Treffen der Arbeitsgruppe verwendet wurden (Deplaix und Soehngen 2013, Soehngen 2013). Eine Änderung der Begriffe wurde nötig, weil die Arbeitsgruppe die Anwender ihrer künftigen Richtlinien nicht von der Verantwortung entbinden wollte, den richtigen, z. B. den nationalen Richtlinien entsprechenden Standard auszuwählen. Angestrebt wurde lediglich eine Orientierungshilfe für die *Bewertung* von Leichtigkeitsbedingungen in spezifischen Fahrsituationen – im Folgenden „Analysefall“ genannt –, um u. a. die Vergleichbarkeit mit anderen Fahrsituationen oder mit einer Zielkategorie zu ermöglichen. Zudem soll Entscheidungsträgern durch unterstützende Argumente die Ermittlung einer geeigneten Kategorie für das „Bemessungsfall“ erleichtert werden. Beide Lesarten, der Analyse- und der Bemessungsfall, werden benötigt, wenn es darum geht, die Leichtigkeitskategorien mit Beispielen aus der Praxis und mit konkreten, für ausgewählte Wasserstraßenabmessungen empfohlenen Werten zu verknüpfen. In den Publikationen der Smart Rivers Konferenz 2013 wurde lediglich die Bemessungslesart berücksichtigt.

5.2 Kriterien zur Auswahl geeigneter und zur Analyse vorhandener Leichtigkeitskategorien

Skalierungsfaktoren für Wasserstraßenabmessungen unterliegen zahlreichen Einflussparametern, die sich auch auf die erforderliche Leichtigkeitsqualität auswirken. Falls Unwägbarkeiten zu berücksichtigen sind, sollte die Bemessung großzügiger ausfallen als bei traditionellen Wasserstraßen üblich. Dies ist beispielsweise der Fall bei schlechten Fahrwasserhältnissen mit starken, hoch turbulenten Strömungen oder unregelmäßigen Ufern oder aber bei zukünftigen Anpassungen an ökologische Anforderungen. Im Gegensatz dazu können gute Informationssysteme mit Autopilotunter-

stützung und modernen Steuersystemen – Bugstrahler, leistungsstarke Zwei-Propelleranlagen und Zwillingsrudder statt Ein-Propelleranlage und Einzelrudder – die Anforderungen an die Abmessung von Wasserstraßen erheblich reduzieren. Die vorgeschlagene fallweise Bemessung kann diesen Einflussparametern in der Regel durch den Einsatz von Schiffsführungssimulatoren Rechnung tragen. Neben diesen mehr oder weniger quantifizierbaren bemessungsrelevanten Aspekten können jedoch auch nicht kalkulierbare Bemessungsrisiken eine Entscheidung für größere, von der Norm abweichende Abmessungen notwendig machen. Ist eine Fahrrinne beispielsweise nur für Richtungsverkehr vorgesehen, weil sich Begegnungs- oder Überholssituationen von Schiffen durch das Verkehrsmanagement vermeiden lassen, muss der nutzbare schiffbare Raum großzügiger bemessen werden als in Fahrinnen für Begegnungsverkehr. Während letztere aufgrund ihrer größeren Breite und ihrer Auslegung auf Schiffsbegegnungen i. d. R. auch bei schlechten Sichtverhältnissen oder starkem Windeinfluss ausreichend Platz zumindest für den Richtungsverkehr bieten, können Fahrinnen, die für den Richtungsverkehr ausgelegt wurden, ohne darüber hinaus gehende Breitezuschläge zu schmal sein, um besonderen Situationen gerecht zu werden. Auch ein hoher zu erwartender Schaden bei Unfällen kann größere Abmessungen notwendig machen, beispielsweise wenn sich in unmittelbarer Nähe der Fahrinne Gebäude, Kaimauern, Bühnen, Felsvorsprünge oder schwimmende Restaurants bzw. liegende Schiffe befinden. In solchen Fällen kann jeder Steuerfehler eine Gefahrensituation verursachen. Ist die Fahrinne dagegen von Sand- oder Kiesböschungen gesäumt, können Steuerfehler zwar zu Uferkontakt führen, es sind jedoch keine schweren Schäden am Schiff oder an der Wasserstraßeninfrastruktur zu erwarten. Auch Zusammenstöße mit anderen Schiffen lassen sich im Notfall durch Auffahren des Schiffes auf das Ufer vermeiden. Die erf. Abmessungen der Wasserstraßen hängen also vom Schadensausmaß im Falle von unwägbareren Situationen ab. Diese können insbesondere durch Einflüsse des Humanfaktor herbeigeführt werden: Sind die Schiffsführer als eine der wichtigsten Einflussgrößen für die Wasserstraßenbemessung gut geschult, erfahren und aufmerksam, sind kleinere Wasserstraßenabmessungen akzeptabel. Ein schlecht ausgebildeter, abgelenkter oder gestresster Schiffsführer wird aber mehr Platz zum Navigieren benötigen.

Alle vorstehend genannten und weitere Aspekte („*gemischte Kriterien*“) sind in Tabelle 7 in der *ersten „Bewertungsgruppe“* zur Ermittlung geeigneter Leichtigkeitskategorien erfasst. Eine zweite Bewertungsgruppe betrifft die *Schiffsgeschwindigkeit* (Tabelle 8), eine dritte den Parameter *Verkehrsstärke* (Tabelle 9), dessen Verknüpfung mit der erforderlichen Leichtigkeitsqualität evident ist. Bei einer niedrigen Verkehrsstärke ist das Unfallrisiko sehr viel kleiner als bei viel Verkehr (Anzahl der Begegnungen steigt mit dem Quadrat der Verkehrsdichte). Auch politisch-ökonomische Verluste aufgrund von Beschränkungen, die unterdimensionierten Wasserstraßen mit hohem Verkehrsaufkommen auferlegt werden müssen, sind offensichtlich und sollten vermieden werden. Analoge Kriterien finden sich in einigen nationalen Richtlinien und auch im Bericht von MARCOM WG 49. Alle drei Bewertungsgruppen lassen eine mehr oder weniger klare Zuordnung zu einer der drei in Tabelle 6 definierten Leichtigkeitskategorien zu.

Es obliegt dem Anwender künftiger Richtlinien, die möglicherweise unterschiedlichen Ergebnisse der drei Kategorisierungsgruppen gegeneinander abzuwägen.

Eine detailliertere Betrachtung des Geschwindigkeitskriteriums bringt folgende Erkenntnisse: Bei niedrigen Geschwindigkeiten wie sie z. B. in der Bergfahrt in Kanälen oder Flüssen erreicht werden, bleibt mehr Zeit, um Steuerfehler zu korrigieren oder auf unwägbar Situationen zu reagieren als bei hohen Geschwindigkeiten wie in der Talfahrt auf Hochwasser führenden Flüssen. Je höher also die mögliche oder zulässige Geschwindigkeit ist, desto höher sollte die Leichtigkeitskategorie sein. Dies gilt auch für Strecken, die in erheblichem Maße von Sportbooten, vor allem Ruderbooten (eingeschränkte Sicht) oder Kanus (Wellenempfindlichkeit) befahren werden. Nur so kann die Sicherheit der Bootsführer gewährleistet werden. Umgekehrt ist jedoch in Situationen, in denen der Steuermann zur schnellen Fahrt *gezwungen* ist – beispielsweise stromabwärts in enger Kurvenfahrt auf einem frei fließenden Fluss mit hoher Fließgeschwindigkeit – die Notwendigkeit zur Fahrt mit hoher Geschwindigkeit ist dann ein Kriterium für eine niedrigere Einstufung der Leichtigkeit, es sei denn, die Zusatzbreite in der Kurvenfahrt kann mit passiven Bugrudern oder starken Bugstrahlern wirksam begrenzt werden. Das Geschwindigkeitskriterium sollte sich daher aus drei Parametern zusammensetzen: Der absoluten Größe der Schiffsgeschwindigkeit, der Verkehrsstärke (von Sportbooten) und dem fahrbaren bzw. dem notwendigen Geschwindigkeitsbereich. Ist Letzterer grundsätzlich hoch, z. B. im Stillwasser, ist auch die zugehörige Leichtigkeitskategorie hoch zu bewerten. In Situationen, in denen ein begrenztes „Geschwindigkeitsfenster“ Voraussetzung für eine sichere Fahrt ist, ergibt sich jedoch eine niedrige vorhandene Leichtigkeitskategorie, so zum Beispiel in auf Richtungsverkehr ausgelegten Kanälen, bei denen die Differenz zwischen der kritischen Geschwindigkeit (brechende Heckwelle) und der zur Sicherstellung einer normalen Reaktion des Boots auf Ruderlegung erforderlichen Mindestgeschwindigkeit sehr gering ist (zugehöriges Schiffsgeschwindigkeitsfenster in deutschen Kanälen für Richtungsverkehr ca. 2 km/h oder weniger).

5.3 Bezeichnung verschiedener Leichtigkeitskategorien

Bevor jedoch eine Bewertung der Fahrbedingungen mithilfe der Leichtigkeitskategorien möglich ist, müssen diese zunächst definiert und benannt werden. Zu diesem Zweck werden exemplarisch die Fahrwasserbedingungen im Niederrhein in Deutschland oder den Niederlanden betrachtet. Dort erlaubt die vorhandene Breite der Fahrrinne selbst bei Hochwasser und für alle zugelassenen Wasserfahrzeuge eine nahezu uneingeschränkt leichte Fahrt. Im Vergleich dazu ist die enge Durchfahrt von historischen Brücken, wie etwa der Alten Brücke am Neckar in Heidelberg, nur mit erhöhter Aufmerksamkeit und gut ausgerüstetem Schiff sicher zu bewältigen. Man kann also die Fahrt auf dem Niederrhein als „nahezu uneingeschränkt leicht“ (Bezeichnung „A“ in Tabelle 6) und die Fahrt auf dem Neckar an der Alten Brücke als „streckenweise stark eingeschränkt leicht“ (Bezeichnung „C“) bewerten. Diese Bezeichnung

gen werden in Tabelle 6 für zwei von drei Leichtigkeitskategorien verwendet. Warum wurden jedoch exakt drei Kategorien gewählt und nicht etwa zwei wie im Kanalprofil der niederländischen Richtlinien („normal“ und „eng“) oder mehr als drei, um eine genauere Kategorisierung zu ermöglichen? Ein Grund hierfür ist die Entscheidung von WG 141, sowohl das obere Ende des Spektrums möglicher Sicherheits- und Leichtigkeitsstandards zu vernachlässigen, bei dem alle möglichen Schiffe, selbst schlecht ausgestattete mit dürftig geschultem Steuerpersonal, im betreffenden Gebiet sicher und ohne gegenseitige Behinderung fahren können (der Schwerpunkt von WG 141 liegt wie oben erwähnt auf den erforderlichen *Mindestabmessungen* der Wasserstraße), als auch das untere Ende des Spektrums mit extrem eingeschränkten Bedingungen, die den Steuermann zu einer stark reduzierten Geschwindigkeit zwingen – etwa bei Einfahrten in Schleusenammern oder Manövern im Hafen, denn die in WG 141 vornehmlich betrachteten Wasserstraßenabmessungen werden durch ein Schiff *in Fahrt*, nicht durch ein Schiff unter Manövrbedingungen mit extrem reduzierter Geschwindigkeit skaliert. Der erneute Blick auf die Fahrwasserhältnisse in europäischen Flüssen lässt die Aufnahme einer weiteren Leichtigkeitskategorie „B“, die zwischen den Extremen von Niederrhein und Neckar liegt, sinnvoll erscheinen. Die Kategorien und ihre Bedeutung werden in Tabelle 6 anhand von Beispielen veranschaulicht.

Qualitätsstufe	Bezeichnung	Beispiele aus bestehenden Wasserstraßen
A	Nahezu uneingeschränkt leichte Fahrt	Niederrhein und Mittelrhein für alle zugelassenen Fahrzeuge, holländische Kanäle für mittelgroße Fahrzeuge, Richtungsverkehr in Begegnungsprofilen der deutschen Standardkanäle
B	Moderat bis stark eingeschränkt leichte Fahrt	Größte zugelassene Fahrzeuge auf dem Mississippi, dem Oberrhein, dem Neckar, in den „Normalprofilen“ der holländischen Richtlinien, Einzelfahrt in deutschen Kanälen für Richtungsverkehr, Brückendurchfahrten bei guter Sicht und üblichen Breitenverhältnissen
C	Stark eingeschränkt leichte Fahrt über kurze Distanzen	Begegnungen der größten zugelassene Fahrzeuge in deutschen Standardkanälen bzw. in den „engen Profilen“ der holländischen Richtlinien, Brückendurchfahrten bei schlechter Sicht, Fahrt bei starken Querströmungen u. im Bereich von Schleusenvorhöfen

Tabelle 6: Bezeichnung der Leichtigkeitsstandards mit Beispielen (in WG 141 noch nicht abschließend erörtert)

5.4 Gemischte Kriterien zur Analyse oder Auswahl geeigneter Leichtigkeitskategorien – 1. Bewertungsgruppe

Im Rahmen des oben vorgestellten Ansatzes zur Ermittlung der geeigneten Leichtigkeitskategorie müssen mehrere Kriterien aufeinander abgestimmt werden. Das zu diesem Zweck verwendete Bewertungssystem basiert auf der Anzahl der zutreffenden Kriterien oder Argumente, wobei vereinfachend nur *positive* Ergebnisse berücksichtigt werden. Die zutreffenden Kriterien werden im entsprechenden Feld der folgenden Tabellen mit „x“ oder „y“ markiert.

- Im *Bemessungsfall* wird die Markierung „x“ dann verwendet, wenn das im entsprechenden Feld der Tabelle genannte Argument für eine höhere erforderliche Leichtigkeitsqualität spricht und die Markierung „y“, wenn eine niedrigere Kategorie vertretbar wäre. Die „x“-Argumente sind in Tabelle 7 in der farbig hinterlegten linken Spalte (warme Farben), die „y“- Argumente in der farbig hinterlegten

rechten Spalte (kalte Farben) erfasst. Augenscheinlich sollte die Leichtigkeitskategorie bei vielen x- und wenigen y-Markierungen höher und bei wenigen x- und vielen y-Markierungen niedriger sein. Die erforderliche Leichtigkeitskategorie richtet sich also nach der Anzahl der x- und y-Markierungen. Über die genaue Anzahl besteht in WG 141 noch Diskussionsbedarf. Den letzten Versuch einer Einigung zeigen die Tabellen 10 und 11, in denen alle Kriterien für die Zuordnung der gemischten, geschwindigkeits- und verkehrsbezogenen Argumente zu einer Leichtigkeitskategorie zusammengestellt sind.

- Im *Analysefall* werden Felder in der linken Spalte (warme Farbe) in Tabelle 7 durch ein „x“ markiert, wenn das im Feld beschriebene Argument für eine niedrigere Leichtigkeitsbewertung für die zu bewertende Fahrtsituation zutrifft. Das heißt, die „x“-Markierungen werden im Analysefall (der z. B. die Fahrbedingungen in einem schmalen Streckenabschnitt erfasst) wahrscheinlich in dieselben Felder eingetragen wie im entsprechenden Bemessungsfall, da eine niedrige Bewertung der bestehenden Leichtigkeit im Analysefall im Bemessungsfall eine hohe Leichtigkeitskategorie erfordert, um eine Verbesserung der Fahrbedingung zu erreichen.

Für die Analyse der bestehenden Wasserstraßenbedingungen oder der Empfehlungen in aktuellen Richtlinien erscheint im Bemessungsfall die höchste Leichtigkeitsbewertung A angemessen, wenn mindestens 5 „x“- und höchstens 2 „y“-Markierungen vergeben wurden. Die Kategorie B scheint angebracht, wenn die Zahl der „x“- oder „y“-Markierungen zwischen 3 und 4 liegt, und die niedrigste Kategorie C scheint bei 2 oder weniger „x“-Markierungen bzw. 5 oder mehr „y“-Markierungen akzeptabel. Entsprechend empfiehlt sich im Analysefall die Vergabe der Leichtigkeitsbewertung A, wenn die Anzahl der „x“-Markierungen bei 2 oder weniger bzw. die Anzahl der „y“-Markierungen bei 5 oder mehr liegt. Die zu bewertende Fahrbedingung erhält die Kategorie B, wenn die Anzahl der „x“- und „y“-Markierungen zwischen 3 und 4 liegt und die niedrigste Kategorie C bei mindestens 5 „x“- und höchstens 2 „y“-Markierungen. Diese Zahlen können sich unter Umständen im Laufe der Diskussion in WG 141 noch ändern.

5.5 Kriterium Geschwindigkeit – 2. Bewertungsgruppe

Für das Geschwindigkeitskriterium kann sich die Festlegung eines Bewertungssystems analog zur 1. Bewertungsgruppe als schwierig erweisen. Daher wurde in Tabelle 8 eine direkte Zuordnung der drei Geschwindigkeitskriterien zu möglichen Leichtigkeitskategorien vorgenommen: Schiffsgeschwindigkeit über Grund mit Auswirkung speziell auf das Schadenspotenzial, Geschwindigkeitsbereich zur Beschreibung des verfügbaren Manövrierraums und Verkehrsaufkommen durch Sportboote, das Frachtschiffen die Gewährleistung der Sicherheit von Bootsführern erschwert.

Ein erster Versuch zur Festlegung spezifischer Werte für die Geschwindigkeit über Grund erfolgte beim 8. Treffen von WG 141 und ist in Tabelle 8 festgehalten. Die Tabellen 10 und 11 geben Aufschluss über die beiden anderen geschwindigkeitsbezogenen Kriterien.

Gemischte Kriterien	<p>x-Argumente, die für eine höhere notwendige Leichtigkeitsqualität im Design- bzw. Bemessungsfall (DF) sprechen bzw. die eine geringere Leichtigkeit im Analyse- bzw. Bewertungsfall (AF) indizieren</p> <p>Designfall (DF): Markiere das Kästchen mit einem 'x', wenn die dort beschriebene nautische Bedingung im Designfall zutrifft</p> <p>Analysefall (AF): Markiere das Kästchen mit einem 'x', wenn die dort beschriebene nautische Bedingung im Analysefall zutrifft</p>	<p>y-Argumente, die eine niedrigere Leichtigkeitsqualität im Design- bzw. Bemessungsfall (DF) akzeptabel erscheinen lassen bzw. die eine höhere vorhandene Leichtigkeit im Analyse- bzw. Bemessungsfall (AF) indizieren</p> <p>Designfall (DF): Markiere das Kästchen mit einem 'y', wenn die dort beschriebene nautische Bedingung im Designfall zutrifft</p> <p>Analysefall (AF): Markiere das Kästchen mit einem 'y', wenn die dort beschriebene nautische Bedingung im Analysefall zutrifft</p>
1 Ladungstyp	Tief abgeladene Schiffe, gefährliche Güter	Leere oder ballastierte Schiffe, keine gefährlichen Güter
2 Ausbildungsstand, Fähigkeiten und Erfahrungen der Schiffsführer	Schlecht ausgebildete Schiffsführer, geringe Revierkenntnisse, wenig Erfahrungen	Optimal ausgebildete, erfahrene Schiffsführer mit guten Revierkenntnissen
3 Aufmerksamkeit, Ablenkung, Beanspruchung der Schiffsführer	Lange, langweilige Fahrt oder permanente Manöverbedingungen	Wenige oder kurzzeitige Manöverbedingungen wie bei Begegnungen oder Brückendurchfahrten
4 Gefährdungspotenzial, mögliche Havarien oder Schäden	Bauwerke, Kaimauern, schwimmende Anlagen, liegende Schiffe in der Nähe des Schiffsfadens, Gefährdung von Leib und Leben	Böschungsufer, Parallelwerke oder kurze Bühnen am Fahrmnenrand
5 Unwägbarkeiten der Fahrwasserbedingungen	Makroturbulenzen, Sekundärströmungen, unregelmäßiger Uferverlauf, Querströmungen, lange Bühnen, steinige oder felsige Sohle, Wind, Nebel	Regelmäßiger Uferverlauf, geböschte sandige oder kiesige Ufer, geringe Windgeschwindigkeit oder Windschutz
6 Verkehrssituation, Interaktion Schiff-Schiff oder Schiff-Ufer	Richtungsverkehr, viele Manöver wie Überholungen	Mehrspurverkehr, übliche Interaktionskräfte
7 Schiffsausrüstung und Steuerung	Nur Hauptrudder oder schwache Bugrudderanlagen, binnengängige Seeschiffe, geringe Antriebsleistung, keine modernen Informationssysteme	Starke Bugstrahlrudder oder große passive Ruder, hohe Antriebsleistung, Zweischraubler, Zwillingsrudder, optimale Informationssysteme
8 Sportbootverkehr	Hoher Verkehrsanteil mit Sportbooten, besonders Ruderer und Kanuten	Wenig Sportbootverkehr oder hauptsächlich Sportmotorboote

Tabelle 7: Gemischte Kriterien zur Auswahl geeigneter oder zur Analyse bestehender Leichtigkeitskategorien – 1. Bewertungsgruppe

Die angegebenen Schwellenwerte für die maximal erreichbaren und zur Gewährleistung der Fahrsicherheit erforderlichen Schiffsgeschwindigkeiten können eventuell eine Quantifizierung möglicher Geschwindigkeitsbegrenzungen gemäß den erforderlichen oder bestehenden Leichtigkeitskategorien unterstützen. Die Geschwindigkeitsangaben in der Tabelle berücksichtigen nahezu einschränkungsfreie Fahrwasserbedingungen wie die in großen Flüssen, Geschwindigkeitsbegrenzungen in Kanälen gemäß aktuellen Richtlinien und örtliche Bestimmungen (z. B. für extrem schmale und flache Kanäle und für den Canal Grande in Venedig - 5 und 7 km/h) sowie typische Geschwindigkeiten bei der Fahrt im Bereich von Schleusenvorhöfen (nicht Ein- oder Ausfahrt in die Schleusen**kammern**).

Die Zuordnung der Leichtigkeitsangaben zur Schiffsgeschwindigkeit ist im Bemessungs- und Analysefall identisch: Eine in einer gegebenen Situation hohe erreichbare Geschwindigkeit spricht für eine hohe Leichtigkeitsbewertung, und die Notwendigkeit einer hohen Schiffsgeschwindigkeit verlangt im Bemessungsfall eine hohe Leichtigkeitskategorie. Beim 2. geschwindigkeitsbezogenen Kriterium, dem Schiffsgeschwindigkeitsbereich gemäß Tabellen 10 und 11, können die Leichtigkeitsbewertungen im Bemessungs- und Analysefall jedoch variieren. Ist beispielsweise aufgrund einer

geringen Wassertiefe nur ein enger Geschwindigkeitsbereich möglich, verlangt diese Situation im Bemessungsfall eine höhere Leichtigkeitskategorie, um z. B. einen erweiterten Navigationsraum zu ermöglichen. Im Analysefall würde dieselbe Fahrssituation jedoch mit einer niedrigen Leichtigkeitsqualität bewertet. Dies gilt gleichermaßen für die Sportboot-schiffahrt, da ein hohes Aufkommen von Privatbooten eine höhere Leichtigkeitskategorie erfordert, im Analysefall jedoch die Leichtigkeitsqualität für Frachtschiffe reduziert. Das Geschwindigkeitskriterium wird daher in den Tabellen 10 und 11 analog zur Tabelle 7 für das Analyse- und Bemessungsszenario getrennt behandelt.

Anzahl Frachtschiffe pro Jahr	Auswahl des Kanalprofils analog zu den holländischen Richtlinien	Zuordnung zur Leichtigkeitsqualität
> 30,000	Einzelfalluntersuchung erforderlich (z.B. Zusatzspuren zur Aufnahme des hohen Verkehrsaufkommens)	A
15,000 – 30,000	„Normales“ Kanalprofil für Begegnungen	B
5,000 – 15,000	„Normales“ Profil, „enges“ Profil für kurze Strecken	B, C
< 5,000	„Enges“ Kanalprofil für Begegnungsverkehr, Richtungsverkehrsprofil für Ausnahmesituationen, z.B. Stichkanäle	C

Tabelle 9: Zuordnung von Leichtigkeitskategorien zur Verkehrsdichte in der gewerblichen Schifffahrt für den Bemessungsfall

Bezeichnung der Schiffsgeschwindigkeit	Betrag der Schiffsgeschwindigkeit über Grund v_{SEG}	Qualitätsstufe der Leichtigkeit	Die v. g. Qualitätsstufe ist aus den unten stehenden Gründen zu wählen bzw. bei der Qualitätsstufe tritt folgendes auf
Keine Restriktionen	≥ 13 km/h	A	Vermeidung starker Sachschäden am Schiff oder an Bauwerken sowie bei Gefahr für Leib und Leben im Fall von Havarien
Angepasste Schiffsgeschwindigkeit	ca. 9 – 10 km/h	A, B	Begrenzung der Interaktionskräfte zwischen Schiffen und zum Ufer und damit zur Durchführung leichter Überholungen
Reduzierte Geschwindigkeit in Kanälen	ca. 7 km/h	B	Reduktion der Wellenhöhen, z.B. zur Konfliktvermeidung mit Sportbooten oder zur Durchführung von Begegnungen
Vorsichtige „Marschfahrt“	ca. 5 km/h	B, C	Stark reduzierte Interaktionskräfte und damit geringe Sicherheitsabstände
Stark reduzierte Geschwindigkeit	ca. 3 km/h	C	Keine signifikanten Interaktionskräfte (Sicherheitsabstände reduzieren sich auf Sichtabstände) mehr
Langsamfahrt	< 2 km/h	C	Keine signifikanten Schäden bei Havarien (Schleuseneinfahrt)

Tabelle 8: Zuordnung von Leichtigkeitskategorien zur Schiffsgeschwindigkeit über Grund

5.7 Kombination der Argumente für bestehende bzw. erforderliche Leichtigkeitskategorien

In den Tabellen 10 und 11 sind alle o.g. Kriterien zur Festlegung der Leichtigkeitskategorien zusammengefasst. Da die Zuordnung zu den Kriterien, beispielsweise aus den Tabellen 6 bis 9, nicht in jedem Fall eindeutig ist, wurde auf Linien zur Kennzeichnung der Zuordnung zwischen den Zeilen verzichtet. Es ist zu beachten, dass in WG 141 noch keine endgültige Abstimmung der Zuordnung erfolgt ist und die Bezeichnungen, die sich auf die Bedeutung des Sportbootverkehrs beziehen, keinen spezifischen Werten zugeordnet sind. Das in den Tabellen skizzierte Bewertungsschema muss seine Tauglichkeit erst unter Beweis stellen, indem er auf verschiedene Bemessungsfälle der verkehrswasserbaulichen Praxis bzw. vorhandene Fahrssituationen angewendet wird. Dies wird eine Aufgabe für nachfolgende Zusammenkünfte von WG 141 sein.

5.6 Kriterium Verkehrsstärke – 3. Bewertungsgruppe

Eines der wichtigsten Argumente mit Einfluss auf die Wahl geeigneter Standards ist das Verkehrsaufkommen. Im Bericht von MARCOM WG 49 begründet beispielsweise eine hohe Verkehrsstärke das Vorsehen von Zusatzbreiten bei der Fahrinnenbemessung. Analog zu den niederländischen Standards für Wasserstraßen, wonach das sogenannte „enge Profil“ (ggf. Leichtigkeitsniveau C) ein Verkehrsaufkommen von unter 5000 Schiffen pro Jahr abdeckt, hat WG 141 für den jeweiligen Querschnitt eine Zuordnung der geeigneten Leichtigkeitskategorien zur Anzahl der kommerziellen Schiffe je Jahr (beide Fahrtrichtungen) vorgenommen (siehe Tabelle 9).

Wie schon beim Geschwindigkeitsbereichskriterium führt die Beurteilung der bestehenden Leichtigkeit beim gleichen Verkehrsaufkommen zu einem anderen Ergebnis als im Designfall, denn im Analysefall ist die Leichtigkeit hoch und kann z.B. mit A bewertet werden, wenn das Verkehrsaufkommen gering ist, während im Bemessungsfall ein niedriges Verkehrsaufkommen eine geringere Leichtigkeit bis zur Stufe C akzeptabel erscheinen lässt. Dieser Sachverhalt wird in den Tabellen 10 und 11 verdeutlicht.

5.6 Schlussfolgerungen und weitere Aktivitäten von WG 141

Die PIANC INCOM Arbeitsgruppe 141 zur Erarbeitung von „Bemessungsrichtlinien für Binnenwasserstraßen“ ist nunmehr seit 4 Jahren mit ihren Aufgaben befasst. Im Ergebnis des Workshops anlässlich der SMART Rivers Konferenz im vergangenen Jahr erfolgten Überarbeitungen oder erste Entwürfe verschiedener wesentlicher Kapitel des zukünftigen Berichts, so etwa zur Analyse bestehender Richtlinien, zu den drei Ansätzen bei der Bemessung von Wasserstraßen und den Aspekten von Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs. Daher ist die AG optimistisch, dass im Laufe des Jahres 2014 ein erster Entwurf der Richtlinien ausgearbeitet werden kann. Dennoch gibt es bei einigen Themen immer noch Diskussionsbedarf, gerade auch im Zusammenhang mit der Auswahl angemessener Sicherheits- und Leichtigkeitskategorien, ihrer Zuordnung zu Best Practice-Beispielen oder den Anwendungsgrenzen von Schiffsführungssimulatoren.

Binnenwasserstraßen

Sachstand der PIANC INCOM WG 141: Bemessungsgrundlage für Binnenwasserstraßen

Erforderliche Qualitätsstufe	Bemessungsfall: Min. erforderliche oder akzeptierte Leichtigkeitsqualität (A, B, C)					
	Verschiedene Kriterien		Kriterien im Zusammenhang mit der Schiffsgeschwindigkeit über Grund v_{SUG}			Verkehr
	Anzahl „x“-Marken	Anzahl „y“-Marken	Entwurfs- v_{SUG} (km/h)	Nutzbarer v_{SUG} Bereich (km/h)	Anteil Sportboote, insb. Ruderer, Kanuten	Anzahl Frachtschiffe pro Jahr
A	≥ 5	≤ 2	> 15 ≥ 14 9 - 10	≤ 2	hoch	> 30,000
B	3 - 4	3 - 4	7 5	3 - 5	mittel	15,000 - 30,000 5,000 - 15,000
C	≤ 2	≥ 5	3 2	≥ 6	niedrig	< 5,000

Tabelle 10: Zuordnung von Leichtigkeitskategorien zu Kriterien aus den Tabellen 7 (gemischte Kriterien), 8 (Geschwindigkeit) und 9 (Verkehrsstärke) für den Bemessungsfall

Vorhandene Qualitätsstufe	Analysefall: Einschätzung der vorhandenen Leichtigkeitsqualität (A, B, C)					
	Verschiedene Kriterien		Kriterien im Zusammenhang mit der Schiffsgeschwindigkeit über Grund v_{SUG}			Verkehr
	Anzahl „x“-Marken	Anzahl „y“-Marken	Erreichbare- v_{SUG} (km/h)	Nutzbarer v_{SUG} Bereich (km/h)	Anteil Sportboote, insb. Ruderer, Kanuten	Anzahl Frachtschiffe pro Jahr
A	≤ 2	≥ 5	> 15 ≥ 14 9 - 10	≥ 6	niedrig	niedrig
B	3 - 4	3 - 4	7 5	3 - 5	mittel	mittel
C	≥ 5	≤ 2	3 2	≤ 2	hoch	hoch

Tabelle 11: Zuordnung von Leichtigkeitskategorien zu Kriterien aus den Tabellen 7 (gemischte Kriterien), 8 (Geschwindigkeit) und 9 (Verkehrsstärke) für den Analysefall

Literatur

Deplaix, J.-M., Soehngen, B. (2013). Workshop Design Guidelines for Inland Waterways - Safety and Ease Standards (PIANC-INCOM WG 141), Smart Rivers Conference 2013

Eloot, K., Verwilligen J., Vantorre M. (2013). Paper 27 - Detailed Design for Inland Waterways: The Opportunities of Real-Time Simulation, Smart Rivers Conference 2013

Fischer N., Treiber M., Soehngen B. (2014). Modeling and Simulating Traffic Flow on Inland Waterways, PIANC World Congress, San Francisco 2014

Koedijk, O., Workshop Design Guidelines for Inland Waterways - Best practice approach - using existing examples (PIANC-INCOM WG 141), Smart Rivers Conference 2013

PIANC (2014). Harbour Approach Channels – Design Guidelines, Report of PIANC-MARCOM WG 121, January 2014

Rettmeier K. (2013). Workshop Design Guidelines for Inland Waterways - Review of Existing Guidelines (PIANC-INCOM WG 141), Smart Rivers Conference 2013

Soehngen B., Rettmeier K. (2013a). Design Guidelines for Inland Waterways (PIANC INCOM WG 141), Smart Rivers Conference 2013

Soehngen, B., Rettmeier, K. (2013b). Workshop Design Guidelines for Inland Waterways - Concept Design Method (PIANC-INCOM WG 141), Smart Rivers Conference 2013

Soehngen, B. (2013). Workshop Design Guidelines for Inland Waterways – Introduction and Presentation of the Work of WG 141, Smart Rivers Conference 2013

VBW (2013). Fahrdynamik von Binnenschiffen, Fachausschuss Binnenwasserstraßen und Häfen (VBW/HTG) und Fachausschuss für Binnenschiffe (VBW/STG), Germany, 2013

Verfasser

Dr.-Ing. Bernhard Söhngen,
Bundesanstalt für Wasserbau
Kussmaulstraße 17
76187 Karlsruhe
Tel.: 0721/9726-4600
E-Mail: bernhard.soehngen@baw.de

Prof. Dr. Katrien Eloot,
Flämische Regierung
Ministerium für Mobilität und öffentliche Arbeiten
Forschung im Bereich Wasserbau
Tel.: +32 (0)3-224-6962
E-Mail: katrien.eloot@mow.vlaanderen.be

Modellierung und Simulation des Verkehrsflusses auf Binnenwasserstraßen

Dipl.-Phys. Nicolas Fischer

TU Dresden, Institut für Wirtschaft und Verkehr,
Dresden

Dr. Martin Treiber

TU Dresden, Institut für Wirtschaft und Verkehr,
Dresden

Dr.-Ing. Bernhard Söhngen

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird ein mikroskopisches Modell des Binnenschiffsverkehrsflusses präsentiert und zur Simulation des einfachen Szenarios einer Binnenwasserstraße mit einer Engstelle angewendet. Das Modell besteht aus (i) einem physikbasierten Teilmodell, welches die Schiffsdynamik im freien Verkehrsfluss beschreibt, (ii) einem weit verbreiteten Fahrzeugfolgmodell für einander folgende Schiffe und (iii) Entscheidungs-Teilmodellen, welche Begegnungen und Überholmanöver behandeln. Situationsabhängig setzt sich das "Schiffs-Folgmodell" über die physikbasierten Komponenten und die Entscheidungsmodelle über beide hinweg. Die Entscheidungsmodelle wurden mithilfe eines neuen Ansatzes formuliert, der auf einem Vergleich des zur Verfügung stehenden mit dem in der aktuellen Fahrtsituation benötigten Verkehrsraum beruht. "Human-Factor" Effekte wurden durch einen statistischen Ansatz zur Bestimmung von Zusatzbreiten berücksichtigt. Eine Methode, diese Zusatzbreiten mit Leichtigkeitskategorien zu verknüpfen, wird dargestellt.

Das Modell wurde auf eine einfache, typische Situation angewendet: Zwei verschiedene Schiffstypen befahren einen Flussabschnitt mit einer Engstelle in der Mitte im Begegnungsverkehr. Es stellte sich heraus, dass die Engstellenkapazität stark von der Zusammensetzung des Verkehrs und dem Verkehrsfluss der talfahrenden Schiffe abhängt.

1. Einleitung

1.1 Motivation und Hintergrund

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) wurde von den Rhein-Außenbezirken der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt der Bundesrepublik Deutschland beauftragt, die Fahrrinnenbreiten des Rheins unterhalb der Staustufe Iffezheim bis zur niederländischen Grenze zu überprüfen und, falls nötig, angepasste Breiten vorzuschlagen. Einer der Hintergründe, neue Untersuchungen durchzuführen, ist die Tatsache, dass die Fahrrinnenbreiten auf dem deutschen Rhein mehr oder weniger historisch gewachsen sind, z.B. um den Verkehr mit großen Flößen zu ermöglichen, und nicht an die sich stetig ändernde Flotte mit allgemein sehr viel größeren, aber besser steuerbaren Schiffen, als in den Jahren in denen die Fahrrinnenbreiten eingeführt wurden, angepasst wurden. Die Fahrrinnenbreiten sind außerdem über weite Abschnitte (mit wenigen Ausnahmen) konstant, z.B. am Oberrhein bis Mainz mit ca. 90 m, am Mittelrhein mit 120 m und flussabwärts von Koblenz mit 150 m, trotz unterschiedlicher Schiffsgrö-

ßen, Flusskrümmungen oder Querströmungen. Das heißt, dass weder die möglichen Verkehrssituationen, d.h. Richtungs- oder Begegnungsverkehr mit Überholmanövern aller erlaubten Schiffstypen, von Abschnitt zu Abschnitt gleich sind, noch dass die Schiffe mit der gleichen Leichtigkeit und Sicherheit (kurz: L&S) fahren können. Diese Situation soll in Zukunft, z.B. durch Anpassung der lokalen Fahrrinnenbreiten, an die Anforderungen moderner Schiffe und existierende und zukünftige Verkehrssituationen, verbessert werden.

Im Vergleich zur heutigen Situation kann dies zu breiteren Fahrrinnen an existierenden Breiten-Engstellen führen. Jedoch sollten betriebswirtschaftliche Aspekte, Anforderungen der Leichtigkeit und Sicherheit der Schifffahrt, sowie ökologische und volkswirtschaftliche Aspekte, beim Fahrrinrendesign angemessen berücksichtigt werden.

In diesem Zusammenhang müssen die möglichen Behinderungen der Schifffahrt im Falle von unzureichenden Fahrrinnenbreiten für die größten Schiffe und angestrebten Verkehrssituationen bewertet werden. Diese Behinderungen sind die Verringerung der möglichen Schiffsgeschwindigkeiten und – noch wichtiger – die Wartezeiten vor Engstellen. Dies ist die Aufgabe der Untersuchungen der BAW, welche hier vorgestellt und u.a. vom Lehrstuhl für Verkehrsökonomie und -statistik der TU Dresden ausgearbeitet werden. Sie sind Teil einer dreiteiligen Untersuchung:

- Zunächst wurden die existierenden Schifffahrtsbedingungen unter besonderer Berücksichtigung kritischer Situationen und Verkehrsstatistiken an einigen typischen Engstellen des Rheins durch Videobeobachtungen und Auswertung von AIS-Daten untersucht (BAW, zusammen mit dem Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme der Universität Duisburg-Essen).
- In einem zweiten Schritt wurde der benötigte Raumbedarf ausgewählter Schiffstypen bei verschiedenen Abladetiefen und Pegelständen durch GPS-Messungen beobachtet und von der BAW insbesondere mit Blick auf die Zusatzbreiten in Kurven, bei Querströmungen und den "Human-Factor" betreffend analysiert. Diese wurden unter Berücksichtigung von schiffahrtlichen Simulationsmethoden extrapoliert, um die technisch notwendigen Fahrrinnenbreiten in ausgewählten Bemessungsfällen zu bestimmen. Dieser Ansatz basiert auf vorhergehenden Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verbesserung der Schifffahrtsbedingungen auf dem bekannten Mittelrheinabschnitt zwischen Mainz und St. Goar, insbesondere um Fahrrinnen zu vertiefen. Dies kann an Tiefenengstellen mit weniger Aufwand erreicht werden, wenn die Fahrrinne schmaler ist. Das Forschungsprojekt KLIWAS, "Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt", in welchem z.B. Maßnahmen zur Abschwächung negativer Effekte des Klimawandels gesucht wurden (Wassermann et al. 2010, Söhngen & Paprocki, 2013), führte zu mehreren semi-empirischen Formeln zur Berechnung der verschiedenen Anteile des Breitenbedarfs von Schiffen auf einem Fluss. Diese werden in Abschnitt 2.1 näher beschrieben.

- Der dritte Schritt der Untersuchungen ist die Entwicklung eines Modells zur Verkehrssimulation, um die genannte Behinderung der Schifffahrt an Breitenengstellen zu untersuchen. Die Anwendung vereinfachter und daher schneller Berechnungsverfahren in der Verkehrssimulation ist nötig, um eine große Zahl von Simulationsläufen zu ermöglichen, z.B. um mögliche Konflikte zu prüfen und in Analogie zu echten Schiffsführern zu lösen, aber auch zur Berechnung einer großen Zahl von Situationen über einen langen Zeitraum, um Verkehrsstatistiken zu generieren und auf diesem Weg Zufallseffekte auszuschließen.

1.2 Verkehrssimulation

Ähnlich zu der Situation im Straßenverkehr haben Engstellen auf engen, stark befahrenen Binnenwasserstraßen einen großen Einfluss auf den Betrieb von Schiffen. Engstellen auf Binnenwasserstraßen umfassen nicht nur statische Engstellen, wie Schleusen oder enge Passagen, sondern auch dynamische Engstellen die von verschiedenen Faktoren wie Schiffsgröße, Geschwindigkeit, Kurven und dem Fahrrinnenprofil abhängen. Diese werden durch die dynamische Berechnung der von jedem Schiff benötigten Fläche mit den von Söhngen & Paprocki (2013) beschriebenen und durch VBW (2013) veranschaulichten Methoden beschrieben. Durch den Vergleich des benötigten mit dem zur Verfügung stehenden Platz können Engstellen, die vom Zustand der beteiligten Schiffe abhängen, erkannt werden. Weiterhin werden genäherte Bewegungsgleichungen für einzelne Schiffe auf einem frei fließenden Fluss, abgeleitet von einem physikbasierten Modell, von Wassermann et al. (2010) vorgestellt.

Aktuelle Simulationen von Binnenschiffsverkehr legen den Schwerpunkt auf statische Engstellen, insbesondere Schleusen und deren Betriebseigenschaften wie Betriebszeiten. Dai, M. & Schonfeld, P. (1993) präsentieren ein mikroskopisches Modell mit Schwerpunkt auf Verzögerungen durch Variationen in Schleusenzeiten. Reisezeiten zwischen Schleusen werden durch die Annahme konstanter Geschwindigkeiten approximiert. Faktisch ist ihr Modell eine Anwendung der Warteschlangentheorie.

Ein mikroskopisches Modell mit Schwerpunkt auf Seeschiffen, die den Hafen von Antwerpen in Belgien durch eine Zahl von Schleusen anlaufen und verlassen, wird von Thiers, G.F. & Janssens, G.K. (1998) präsentiert. Es beinhaltet Interaktionen zwischen Schiffen wie bei Kreuzungen und Überholmanövern und allgemeine Schifffahrtsregeln.

Nach unserem Wissen wurden bisher weder Modelle noch Simulationstools für einen physikalisch realistischen Verkehrsfluss auf frei fließenden Flüssen veröffentlicht. Ein solches Modell sollte nicht nur die physikalisch basierte Bewegung eines einzelnen Schiffes in Gegenwart einer statischen oder dynamischen Engstelle beschreiben. Es muss außerdem Wechselwirkungen mit anderen Schiffen wie Begegnungen, Überholmanöver oder antizipative Verzögerung, um eine kritische Begegnung in oder in der Nähe einer Engstellen zu vermeiden, beinhalten. Ergänzend zu den physikalischen Kräften ergeben solche Wechselwirkungen

"soziale Kräfte", welche die physikalischen Bewegungsgleichungen erweitern oder ersetzen.

Während unseres Wissens keine dynamischen Interaktionsmodellen für den Binnenschiffsverkehr existieren, gibt es solche Modelle für den Fußgängerverkehr ("social force model" von Helbing, D. (2001)) und Autoverkehr. In letzterem wird die longitudinale Dynamik durch Fahrzeugfolgemodelle beschrieben, die transversale Dynamik durch Spurwechselmodelle (siehe, z.B., Treiber, M. & Kesting, A. (2013)). Beispiele von Fahrzeugfolgemodelle, die für eine Verallgemeinerung auf den Verkehr auf Wasserstraßen geeignet sind, sind das Intelligent-Driver Model (IDM) von Treiber, M. et al. (2000) oder eine Erweiterung davon, das "Improved IDM" (IIDM) von Treiber, M. & Kesting, A. (2013).

In diesem Artikel schlagen wir ein dynamisches mikroskopisches Modell für den Verkehrsfluss auf Binnenwasserstraßen vor, in dem wir die physikbasierten Bewegungsgleichungen und die Modelle für dynamischen Engstellen von Söhngen et al. (2014) mit einem IIDM-basierten "Schiffsfolgmodell" und neu entwickelten Entscheidungsmodellen für Begegnungen und Überholmanöver verbinden.

Wir simulieren multimodalen Begegnungsverkehr im Bereich einer Engstelle und zeigen, wie das Modell verwendet werden kann, um Engstellen zu identifizieren, Kapazitäten abzuschätzen, benötigte Fahrrinnenbreiten und -tiefen abzuschätzen und Empfehlungen für maximale Schiffsgrößen zu ermitteln.

In Abschnitt 2 führen wir das Modell ein. In Abschnitt 3 beschreiben wir die Simulation von Engstellen mit Begegnungsverkehr und untersuchen den Einfluss verschiedener Schiffstypen und relativer Verkehrsnachfragen auf die Engstellenkapazität. Im abschließenden Abschnitt 4 diskutieren wir die Ergebnisse und zeigen Ansätze für zukünftige Forschungsvorhaben auf.

2. Modellbeschreibung

Wir nutzen einen eindimensionalen mikroskopischen Ansatz, um den Verkehrsfluss auf Binnenwasserstraßen zu simulieren. Das bedeutet, dass jedes Schiff als individuelles Objekt mit Attributen wie Schiffstyp, -maßen, maximaler Leistung oder Tiefgang und dynamischen Variablen wie Richtung, Beschleunigung, Geschwindigkeit und Position simuliert wird. Die Bewegungsgleichungen jedes Schiffes beinhalten physikalische Gesetzmäßigkeiten und Begrenzungen, die im physikalischen Teilmodell (vgl. Abschnitt 2.1) spezifiziert sind. Die Gleichungen beinhalten außerdem Interaktionen mit anderen Schiffen in Form eines Verhaltens-Teilmodells für den Schiffsführer, mit dem Zweck eine schnelle und effiziente Passage zu ermöglichen und kritische Situationen zu vermeiden (vgl. Abschnitt 2.2).

Wir definieren verschiedene Verkehrssituationen wie freien und gebundenen Verkehr, sowie Überholmanöver und Begegnungen. Einige dieser Situationen können zeitgleich auftreten, aber jede wird von einem bestimmten Teil des Verkehrsmodells beschrieben. Freier Verkehr beschreibt die Situation in der ein Schiff nicht durch das Verhalten eines anderen Schiffes beeinträchtigt wird. Wenn ein Schiff aufgrund eines voraus-

fahrenden Schiffes seine Fahrt verlangsamen muss, reden wir von gebundenem Verkehr. Begegnungen treten auf, wenn sich ein entgegenkommendes Schiff innerhalb eines festgelegten Radius ("Informationsradius") befindet. Diese Situationen treten ohne eine aktive Entscheidung des Schiffsführers auf. Die Entscheidung ein vorausfahrendes Schiff zu überholen wird durch ein Anreiz- und ein Sicherheitskriterium beschrieben.

Das Verhaltensmodell selbst besteht aus verschiedenen Komponenten: Einem longitudinalen Beschleunigungsmodell, ähnlich einem Fahrzeugfolgmodell für den Straßenverkehr, und Entscheidungsmodellen um zu bestimmen, ob eine Begegnung mit entgegenkommenden Schiffen sicher oder ob ein Überholmanöver gewünscht und sicher ist. Die Entscheidungs-Teilmodelle interagieren mit dem Longitudinalmodell, indem sie die Beschleunigung während Begegnungen oder Überholmanövern anpassen. Alle Sicherheitskomponenten des Verhaltensmodells basieren auf den dynamischen Flächen, die jedes Schiff für eine sichere Fahrt benötigt. Diese werden durch longitudinale Sicherheitsabstände und minimale seitliche Abstände beschrieben, die auf dem dynamischen Zustand des Schiffes (Geschwindigkeit, Richtung), auf der Flussgeometrie und dem Strömungsprofil basieren. Die letztgenannten sind in Abschnitt 2.1 beschrieben. Für jede Kombination von Schiffsgeschwindigkeiten kann der benötigte und zur Verfügung stehende Platz berechnet werden. Durch Diskretisierung der Geschwindigkeiten und Positionen auf dem Fluss können die Engstellen für verschiedene Szenarien im Voraus berechnet werden.

Anstelle einer vollen zweidimensionalen Bewegung simulieren wir die longitudinale Bewegung unter der Annahme, dass das Schiff lateral einer gegebenen Kursachse folgt, d.h. wir wenden effektiv ein eindimensionales Modell an. Die gesamte laterale Dynamik sowie die Beschränkungen (z.B. beim Überholen oder Begegnen) sind im Entscheidungs-Teilmodell enthalten.

Die "Human-Factor" Effekte werden berücksichtigt

- (1) durch die Nutzung eines beschränkten Informationsradius, das heißt, der Reichweite innerhalb der der Schiffsführer Informationen über andere Schiffe bekommt,
- (2) durch verschiedene Schiffsführer mit unterschiedlichen nautischen Kenntnissen, persönlicher Fitness oder Mentalität, die die Entscheidung bei der Konfliktvermeidung beeinflussen (z.B. vor einer Engstelle zu warten oder eine geringere Leichtigkeit zu akzeptieren) und
- (3) durch eine empirische Wahrscheinlichkeitsverteilung von menschlich bedingten Zusatzbreiten.

Letztere sind Teil der semi-empirischen Gleichungen, die im nächsten Abschnitt vorgestellt werden. Mögliche Konflikte können während der Simulation nicht in jedem Fall gelöst werden – selbst wenn es numerisch möglich wäre, da es sich in diesem Fall um einen künstlich gesteuerten Verkehr und nicht um reale Verkehrssituationen handeln würde. Ungelöste Konflikte beruhen insbesondere auf dem gewählten Informationsradius. Dieser kann mit dem gewählten Schiffsführertyp verknüpft und zufällig variiert werden. Nach der Simulation müssen die ungelösten Konflikte, unter Berücksichtigung

der benötigten Breiten, um eine Havarie zu vermeiden, z.B. durch sehr aufmerksames Fahren (Reduktion der menschlich bedingten Zusatzbreite) oder durch Einsatz des Bugstrahlruders (wenn möglich), bewertet werden.

Unter Berücksichtigung dieser Bewertungsstufen wird die Schwierigkeit des Manövers und dadurch die reale Leichtigkeit in jeder kritischen Situation ein. Dies erlaubt dem Nutzer der Verkehrssimulation, die Notwendigkeit von Fahrinnenverbreiterungen anhand der Wahrscheinlichkeit kritischer Situationen zu beurteilen. Die Zuweisung einer bestimmten Situation zu einer Leichtigkeitsskategorie kann nach PIANC INCOM WG 141 (Deplaix & Söhngen, 2013, Söhngen 2013) vorgenommen werden. Ein erster Entwurf einer möglichen Zuordnung ist in Abschnitt 2.1.3 gegeben.

2.1 Das Physik-Modell

Wie zuvor erwähnt ist es nicht praktikabel, detaillierte nautische Simulationsmethoden wie die aus Schiffsführungssimulatoren in Verkehrssimulationen zu verwenden, insbesondere den benötigten Flächenbedarf betreffend. Einer der Gründe, wie oben angedeutet, ist die hohe Rechenzeit dieser Simulationstechniken. Aber selbst wenn die Rechenzeiten sehr viel kürzer wären, ist es beim gegenwärtigen Stand der Modellierungstechnik nahezu unmöglich, ein Schiff mit einem Autopiloten realistisch in einem zweidimensionalen Gebiet zu steuern und dabei das aktuelle Fahrwasser, die Fahrzeugdynamik und die Verkehrssituation zu berücksichtigen. Daher sind im derzeitigen Stadium von Rechenanlagen und Wissen Vereinfachungen nötig:

1. Nutzung von Querprofilen in 100 m Abständen, um das verfügbare Fahrwasser zu definieren, die Wassertiefen, Längs- und Querströmungsgeschwindigkeiten sowie ihre Verteilung über den Querschnitt – wie im Fall der Anwendung eines eindimensionalen Strömungsmodells. Auf dieser Basis können die möglichen Abladetiefen, Schiffsgeschwindigkeiten und benötigten Flächen berechnet werden.
2. Verwendung von gemittelten Kursachsen und entsprechenden Kurvenradien, welche üblicherweise aus Naturdaten für alle relevanten Schiffstypen (Klassen Va, Vb und VI), Abladezustand (leer oder beladen) und Fahrtrichtung (zu Berg, zu Tal) kommen.
3. Nutzung von semi-empirischen Formeln, abgeleitet aus Naturdaten und fahrdynamischer Theorie, welche alle deterministischen Einflüsse auf (a) longitudinale und (b) seitliche Bewegung des Schiffes betreffen, wie
 - (a) Schiffswiderstand und benötigte Maschinenleistung, abhängig von Schiffsgeschwindigkeit relativ zum Wasser, kritischer Schiffsgeschwindigkeit, Fahrtrichtung, Fließgeschwindigkeit, Flussbett-Rauheit und longitudinaler Wasserspiegelneigung, um die Schiffsgeschwindigkeit

für eine gewählte Maschinenleistung zu berechnen (Wassermann et al. 2010),

- (b) Schiffsabmessungen, Zusatzbreiten in Kurven eines driftenden Schiffes mit und ohne Bugstrahlrudernutzung, Zusatzbreiten, um Querströmungen und Seitenwind entgegenzuwirken, Zusatzbreiten, die benötigt werden, um Manöver wie Begegnungen und Überholmanöver durchzuführen oder um nahe an Ufer oder Buhnen zu fahren.
- 4. Nutzung vereinfachter Formeln, um Zusatzbreiten aufgrund von Instabilitäten des Schiffs-kurses, Fähigkeiten oder Unaufmerksamkeit des Schiffsführers ("Human-Factor"), die aus Natur- oder Modelldaten abgeleitet und im Allgemeinen statistisch verteilt sind (Söhngen & Rettmeier 2013).

Im Folgenden werden zwei wichtige Beiträge zu den benötigten Breiten, neben der Breite des Schiffes, detailliert betrachtet: Die Zusatzbreite in Kurven mit und ohne Bugstrahlruder (Abschnitt 2.1.1) und die Zusatzbreite in der Nähe von Buhnen (Abschnitt 2.1.2). Außerdem wird in Abschnitt 2.1.3 ein Ansatz zum Umgang mit "Human-Factor" Effekten vorgestellt.

2.1.1 Zusatzbreite in Kurven ohne Nutzung des Bugstrahlruders

Wenn der Schiffsführer keine aktiven Kräfte mobilisieren kann, wie die aus einem Bugstrahlruder, um die Zentrifugalkraft und Sekundärströmungen auf fließenden Flüssen direkt zu kompensieren, muss das Schiff einen Driftwinkel gegen die seitliche Abdrift einnehmen. In einem Gleichgewichtszustand werden die zentrifugalen Kräfte durch die Querkräfte auf das driftende Unterwasserschiff genau kompensiert. Da die Driftkräfte im Allgemeinen über die Länge des Schiffes nicht konstant sind, müssen die entsprechenden Drehmomente ebenfalls kompensiert werden, hier durch entsprechende Ruderkräfte. Tatsächlich bestimmt die Schiffsgeschwindigkeit relativ zum Wasser v_{sw} , welche die mögliche Querkraft auf das Unterwasserschiff durch Driften skaliert, zusammen mit dem Tiefgang T und der Wassertiefe D , abhängig von der Schiffsgeschwindigkeit über Grund, welche die Zentrifugalkraft skaliert, den nötigen Driftwinkel β und damit die Zusatzbreite in Kurven Δb_K . Diese hängt nach den geometrischen Überlegungen in Abb. 1, mit der relativen Position des Schiffsdrehpunktes c_F zusammen.

Dies führt zu der folgenden Näherungsgleichung, die gilt, wenn die Länge L des Schiffes klein im Vergleich zum Kurvenradius R ist. Die Gleichung zeigt den starken Einfluss von c_F und L auf die Zusatzbreite:

$$\Delta b_K \approx \frac{1}{2} c_F^2 \frac{L^2}{R} \tag{1}$$

Der Parameter c_F ist als Position des Drehpunktes, gemessen von Heck zu Bug, an dem die Schiffsachse

tangential an der Kurve liegt, geteilt durch die Schiffslänge L definiert. Er hängt stark von T/D ab, mit kleineren c_F im Fall von großen T/D , weil das Wasser im Fall von wenig Platz unter dem Kiel gezwungen ist, sich unter dem Schiff "durchzupressen", was zu großen Querkräften beim Driften führt. Leere Schiffe mit kleinem T/D vergrößern dagegen den c_F -Wert und damit die Zusatzbreite in Kurven. Zusammen mit großen Strömungsgeschwindigkeiten v_{Flow} in der Talfahrt, da diese bei gleicher Geschwindigkeit relativ zum Wasser die Zentrifugalkräfte vergrößert, führt dies zu größeren benötigten Driftwinkeln um diesen vergrößerten Kräften entgegenzuwirken. Das Ergebnis ist ein starker Einfluss von v_{Flow}/v_{sw} auf c_F wie es in Abb. 2 für ein Schiff der Klasse Va dargestellt ist.

Abbildung 2 basiert auf der Theorie des Kräftegleichgewichts, wobei nicht nur Zentrifugal-, Drift- und Ruderkräfte betrachtet werden, sondern auch der Einfluss der Wasserspiegel-Querneigung. Letztere unterstützt das Schiff dabei, bei einer Kurvenfahrt im Gleichgewichtszustand auf Kurs zu bleiben. Es kann jedoch vorkommen, dass der Schiffsführer den Driftwinkel einnimmt, bevor er in die Kurve einfährt. In diesem Fall existiert die Neigung des Wasserspiegels noch nicht und die entsprechenden unterstützenden Kräfte sind nicht relevant. Dieser Effekt ist indirekt in Abb. 2 beteiligt, da die Parameter der Theorie, die die Querneigung und die Koeffizienten der Kräfte auf das Unterwasserschiff beinhalten, anhand vieler Messungen in deutschen Kanälen und Flüssen kalibriert wurden. Infolgedessen können die gezeigten c_F -Werte im Fall von Schiffen, die den Driftwinkel kurz vor der Kurve aufnehmen, etwas größer sein (Unsicherheitsbereich ungefähr ± 0.1) und kleiner im Fall einer Gleichgewichtssituation.

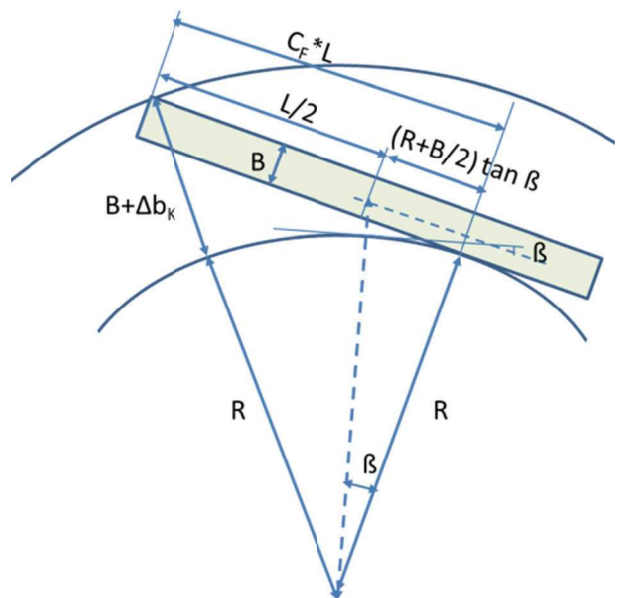


Abbildung 1: Skizze zur Definition der Zusatzbreite Δb_K im Gleichgewichtszustand.

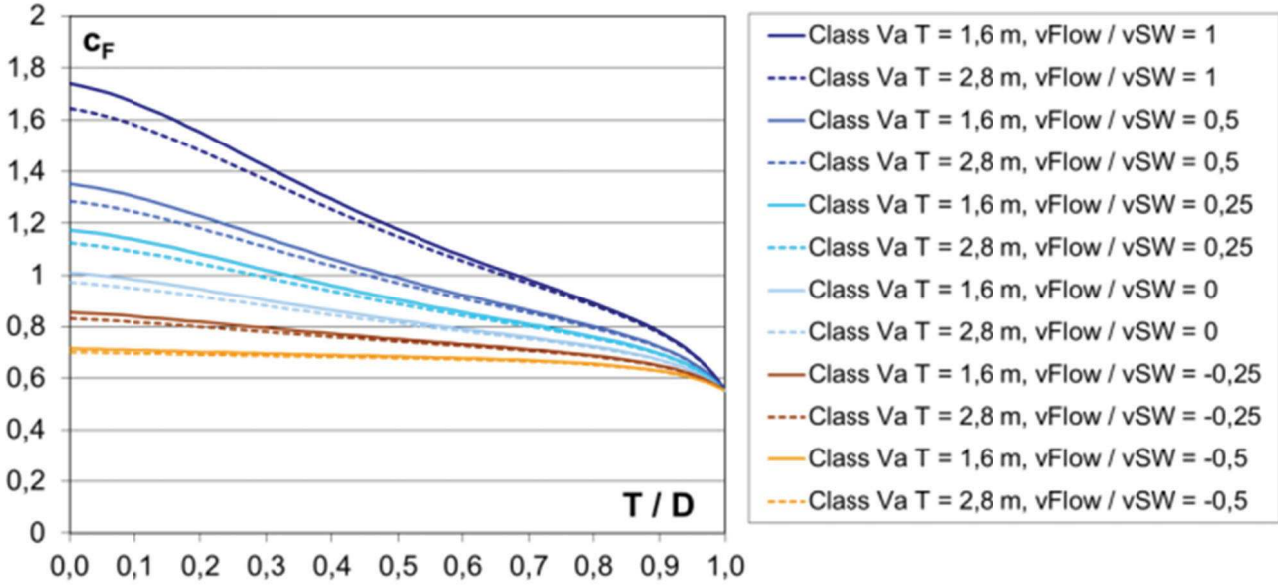


Abbildung 2: Einfluss von Tiefgang zu Wassertiefen-Verhältnis T/D und Fließgeschwindigkeit v_{Flow} (Vorzeichen: - zu Berg und + zu Tal), im Verhältnis zur Schiffsgeschwindigkeit relativ zum Wasser v_{sw} auf den c_F -Wert (ohne Bugstrahlruder, keine Sekundärströmung), berechnet für ein Schiff der Klasse Va ($L = 110\text{m}$, $B = 11.45\text{m}$).

Die semi-empirischen Gleichungen hinter Abb. 2 sind unten gezeigt. Sie nutzen für die Driftkräfte (Terme mit $c_{D,max}$ und $c_{D,0}$, Parameter c^* , β , β_c) den Ansatz von UFC (2005) und die Theorie schlanker Körper, um die so genannten instabilen Momente zu berücksichtigen (Terme mit $c_{m,hy}$ und Parameter c_i), unter der Verwendung empirischer Gleichungen zur Approximation des T/D Einflusses auf die hydrodynamische Masse des Schiffes (Term f_1). Den Einfluss der quergerichteten Wasserspiegelneigung betreffend sagt die Theorie aus, dass die entsprechende unterstützende Kraft im Fall einer quasi-Gleichgewichtssituation betragsmäßig die gleiche ist, wie die Zentrifugalkraft eines Schiffes, das mit der Strömung driftet ($v_{sw} = 0$), d.h. mit der umgebenden Fließgeschwindigkeit zu Tal fährt, da das Wasser des Strömungsfeldes in gleicher Weise durch die Steigung unterstützt wird. Diese Theorie führt zu einem Koeffizienten von $f_{v,2} = 0$ in der Gleichung für $f^{(1)}$, zusammen mit $c_c = 1$. Wenn es keine seitliche Steigung gibt, ergibt die Theorie $f_{v,2} = 1$ und $c_c = 1$, aber die Naturdaten führen zu $f_{v,2} = 0.3$ und $c_c = 1.5$. Daher ist die beobachtete unterstützende Wasserspiegelquerneigung im Mittel kleiner als erwartet, d.h. die aus Messungen abgeleiteten c_F -Werte sind größer als die aus der Theorie bei voll ausgebildeter Wasserspiegelquerneigung.

$$c_F = \frac{1}{2} + c_i \frac{B}{L} + \frac{\frac{2}{c_{D,max}} \frac{B}{L} \frac{\gamma}{\gamma_L} c_c f^{(1)} + \frac{1}{6}}{\frac{c_{m,hy}}{c_{D,max}} \frac{B}{L} \frac{\gamma}{\gamma_L} 4 k' + 1} + \Delta c_{FS} \quad (2)$$

$$c_{m,hy} = f_4(f_3 f_2 + f_1), f_1 = \frac{T/D}{1-T/D}, f_2 = 1 + 0,35 \ln\left(\frac{B}{T} + 1\right), f_3 = \frac{\pi T^2}{2TB + 0,2T^2}, f_4 = \frac{TB + 0,2T^2}{TB} \quad (3)$$

$$k' = 1 - 3,4^{-0,22\left(\frac{L}{B}-1\right)}, f^{(1)} = \left(1 + 2 \frac{v_{Flow}}{v_{sw}}\right) + f_{v,2} \left(\frac{v_{Flow}}{v_{sw}}\right)^2 \quad (4)$$

$$c_{D,max} = c_{D,0} + (c^* - c_{D,0}) \left(\frac{T}{D}\right)^\beta, c_{D,0} = 0,22 \left(\frac{L}{\gamma B}\right)^{\beta_c} \quad (5)$$

Koeffizienten: $\beta_c = 0.5$, $\beta = 2.0$, $\gamma = 0.85$, $\gamma_L = 0.9$, $f_{v,2} = 0.3$, $c^* = 3.2$, $c_c = 1.5$, $c_i = 0.5$

Diese Formeln basieren auf einigen Vereinfachungen die die Rumpfform des Schiffes und die Ruder betreffen. Daher wurde ein Korrekturparameter Δc_{FS} eingeführt. Vergleiche mit Naturdaten zeigen, dass er um ± 0.1 variiert. Im Mittel sind für Schiffe der Klassen Va und Vb, die kein aktives oder passives Bugstrahlruder nutzen, keine Korrekturen notwendig.

Der Vollständigkeit halber sollte erwähnt werden, dass Abb. 2 und die Gleichungen ohne den Einfluss von Sekundärströmungen in Kurven gelten. Diese zwingen den Steuermann zum Ausgleich einen zusätzlichen seitlichen Driftwinkel anzunehmen. Unter der Annahme, dass die entsprechende seitliche Bewegung des Schiffes die gleiche ist wie die Querströmungsgeschwindigkeit der Sekundärströmung, gemittelt über den Tiefgang des Schiffes, führt dies zur folgenden Gleichung, um c_F um den Einfluss der Sekundärströmungsgeschwindigkeit zu erhöhen. Dabei wird eine lineare Verteilung der Sekundärströmungsgeschwindigkeit über die Tiefe und ihre Größe aus geeigneten hydraulischen Modellexperimenten in Flusskrümmungen (Yee-Chung 1990) angenommen:

$$\Delta c_F \approx c_S \frac{D}{L} \left(1 - \frac{T}{D}\right) \frac{|v_{Flow}|}{v_{sw}}, c_S \approx 5.9 \quad (6)$$

Vergleiche zwischen berechneten und beobachteten c_F zeigen außerdem, dass der Einsatz des Bugstrahlruders helfen kann, den c_F -Wert und damit die Zusatzbreite signifikant zu reduzieren, allerdings nur im Fall moderater Schiffsgeschwindigkeiten und starker Bugstrahlruder. Die Theorie, die diese Effekte berücksichtigt ist kompliziert und führt zu keinen für die Verkehrssimulation geeigneten Formeln. Jedoch ist die Forschung in diesem Bereich noch nicht abgeschlossen. Messungen zeigen, dass der c_F -Wert durch die Nutzung eines angemessenen Bugstrahlruders um Δc_F 0.1 bis zu 0.2 reduziert werden kann. Diese einfache Erfahrungsregel wird als ein erster Ansatz in der Verkehrssimulation genutzt.

2.1.2 Zusatzbreiten bei Buhnen

Der frei fließende Rhein wird hauptsächlich durch Buhnen geregelt. Wenn diese fachgerecht entworfen sind, insbesondere wenn das Verhältnis von Buhnenabstand s_G zu -länge l_G zwischen 1 und 2 liegt, wird die Strömung entlang der Buhnenköpfe geführt und turbulente Fluktuationen werden begrenzt. Dennoch können, insbesondere am Anfang und am Ende von Buhnenfeldern und an einigen historisch gewachsenen Buhnenfeldern mit größeren s_G/l_G Verhältnissen, unregelmäßig auftretende und sich ablösende Makrowirbel, insbesondere an Buhnenköpfen, zusammen mit dem zeitlich gemittelten Strömungsfeld entlang der Buhnen, zu signifikanten Querströmungsgeschwindigkeiten führen, wie in Abb. 3 (links) dargestellt. Diese können vom Steuermann hingenommen und nicht durch Manöver ausgeglichen werden, insbesondere in der Talfahrt, da keine Zeit ist, darauf zu reagieren. Dies führt zu einem seitlichen Versatz zum beabsichtigten Schiffskurs und damit zu einer entsprechenden Zusatzbreite. In der Bergfahrt ist die Einwirkdauer der Querströmung sehr viel größer und es macht Sinn, einen Driftwinkel entgegen der Querströmung einzunehmen. Aber auch dieser Driftwinkel vergrößert den benötigten Platz.

Aus der Analyse von Modellversuchen mit verschiedenen Buhneneigenschaften (Länge l_G , Abstand s_G , Wassertiefe, Buhnenhöhe über Grund), hat die BAW statistische Analysen der turbulenten Mischungsweglänge bzw. Wirbelgrößen und entsprechenden veränderlichen

Querströmungen in der Nähe von Buhnen, überwiegend abhängig von dem Verhältnis s_G/l_G und dem Abstand der Kursachse des Schiffes von den Buhnenköpfen (Söhngen et al., 2014), durchgeführt. Durch die Nutzung gemittelter Werte der Querströmungsgeschwindigkeiten können Formeln zur Berechnung der Zusatzbreite in Querströmungsfeldern verwendet werden, die aus Schiffsführungs-Simulationen stammen (Söhngen et al., 2012). Für ein gegebenes s_G/l_G Verhältnis und für Wasserstände unter den Buhnenköpfen, skalieren die entsprechenden Zusatzbreiten überwiegend mit der Strömungsgeschwindigkeit (je größer desto größer) und der Schiffsgeschwindigkeit (je größer desto kleiner), mit großen Werten für langsame Bergfahrten und kleineren für eine schnelle Talfahrt, insbesondere aufgrund der unterschiedlichen Einflusszeiten.

Im Gegensatz verursacht die schiffsinduzierte Absenkung des Wasserstands eine Strömung aus dem Buhnenfeld in Richtung des Schiffes, wie in Abb. 3 (rechts) gezeigt. Diese schiffsinduzierte Querströmung führt durch die größere Wasserspiegelabsenkung bei größeren Schiffsgeschwindigkeiten relativ zum Wasser zu einer entsprechend größeren Zusatzbreite. Dies ist in Abb. 4 an für den Rhein typischen Randbedingungen gezeigt.

Die entsprechenden Formeln sind zu kompliziert, um hier vorgestellt und während der Verkehrssimulation genutzt zu werden, da sie für jede Verkehrssituation angewendet werden müssen. Das heißt: Für jedes Schiff und jedes Querprofil muss jedes mögliche Szenario vor dem nächsten Zeitschritt überprüft werden. Daher werden alle möglichen Zusatzbreiten, abhängig von Schiffstyp, Abladetiefe, Schiffsgeschwindigkeit und Abstand zu den Buhnen (zur Vereinfachung und um auf der sicheren Seite zu liegen kann dieser Abstand für ein Schiff am Rand der Fahrrinne gewählt werden) an allen Querprofilen einmal für diskrete Werte der dynamischen Parameter berechnet und gespeichert.

Das Beispiel in Abb. 4 zeigt, dass die Zusatzbreite bei Buhnen im Fall von großen Strömungs- und Schiffsgeschwindigkeiten größer als die Schiffsbreite sein kann. Die angegebenen Werte sind typisch für einige Rheinabschnitte.

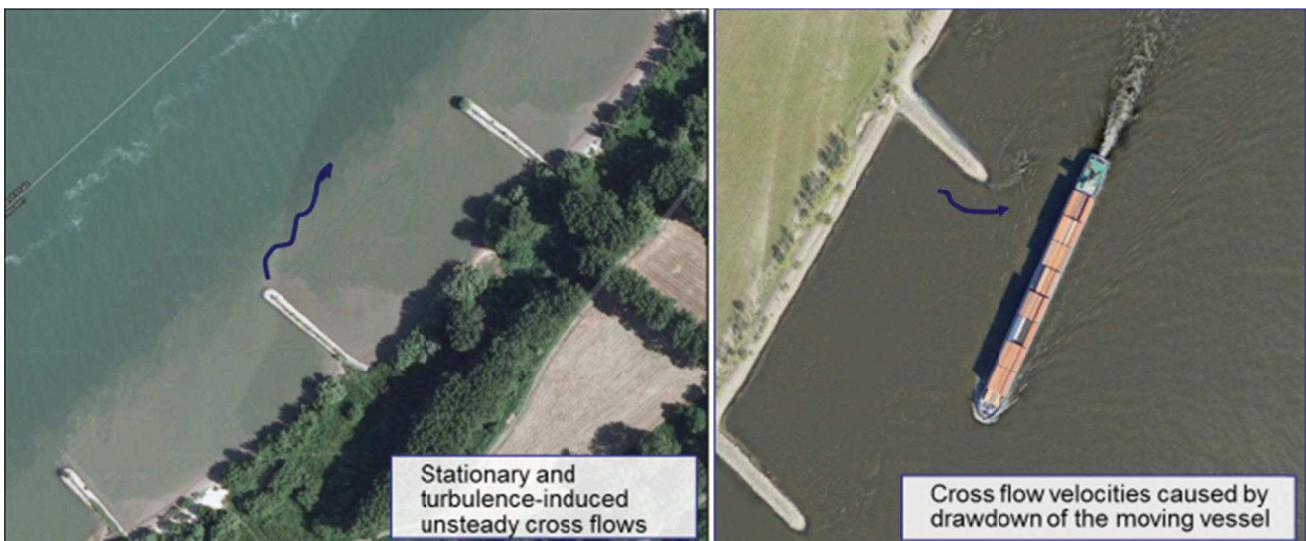


Abbildung 3: Veranschaulichung der turbulenz- (links) und schiffsinduzierten Strömungen (rechts) in der Nähe von Buhnen.

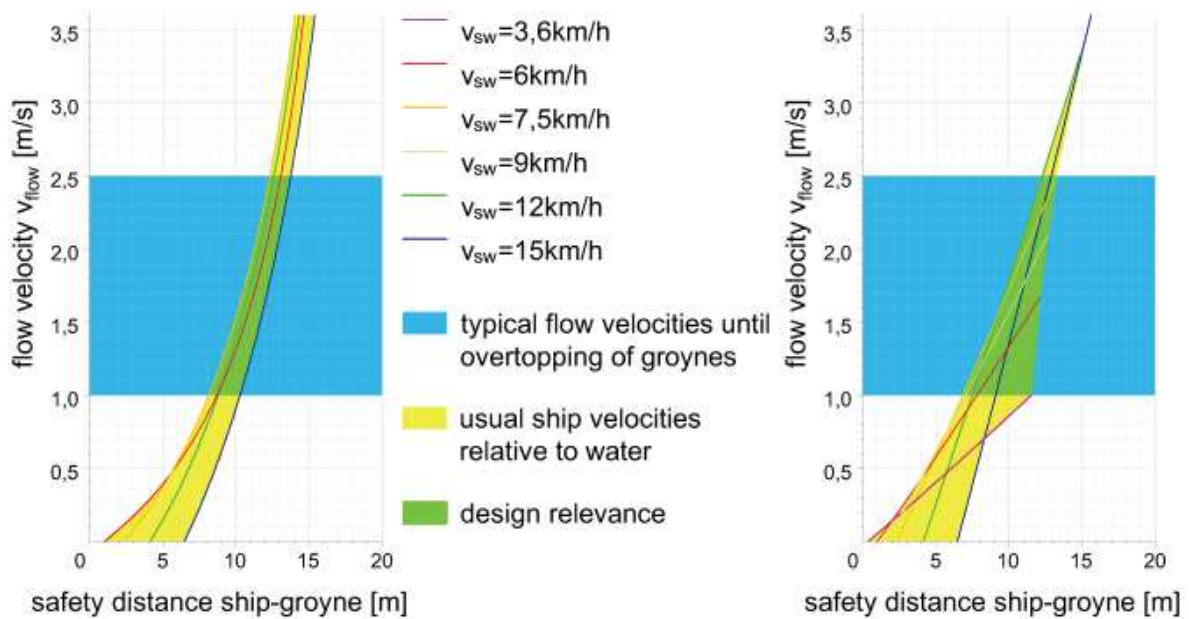


Abbildung 4: Zusatzbreiten für ein voll abgeladenes Schiff der Klasse Va ($T = 2.8\text{m}$) in der Talfahrt (links) und Bergfahrt (rechts) mit verschiedenen Schiffsgeschwindigkeiten relativ zum Wasser v_{sw} , für typische Randbedingungen des Mittelrheins ($s_G = 200\text{m}$, $l_G = 100\text{m}$, $v_{\text{Flow}} = 0 - 2.5\text{ m/s}$), bei mittlerem Wasserstand (Buhnen sind gerade überspült, $D = 4\text{m}$) berechnet.

2.1.3 Ein erster Ansatz zur Berücksichtigung der "Human-Factor" Effekte

Die Zusatzbreite Δb_i spielt eine wichtige Rolle bei der Fahrrinnenbemessung und in der Verkehrssimulation. Sie ist u.a. von der niemals optimalen Orientierung des Schiffsführers abhängig, insbesondere bei Containerschiffen oder Leerfahrern. Sie ist weiterhin Folge einer verzögerten Reaktion auf ungewollte Kursabweichungen, weil das fahrende Schiff stets instabil fährt und deshalb solche Kursabweichungen verstärkt (instabiles Moment) oder allgemein der stets begrenzten Aufmerksamkeit und Fähigkeiten des Schiffsführers ("Human-Factor" Effekte) geschuldet. Modellierungsprobleme resultieren vor allem aus der ausgeprägten statistischen Verteilung dieser Zusatzbreiten Δb_i .

Bei der Betrachtung einer Situation mit Richtungsverkehr zeigen Messungen, dass die Parameter dieser statistischen Verteilung, insbesondere die Abhängigkeit des Mittelwerts und der Standardabweichung, von der Krümmung des Flusses (kleinere Werte auf gerader Strecke), dem Schiffstyp (größere Werte für Containerschiffe oder Tanker), der Fahrtrichtung (zu Tal größer als zu Berg) oder der Schiffsgeschwindigkeit (größer bei höheren Geschwindigkeiten) abhängen. Eine geeignete Formel um diese Effekte zu berücksichtigen ist bisher jedoch noch nicht hergeleitet worden. Ein Grund dafür ist, dass die Daten sehr stark streuen.

Abbildung 5 zeigt dies. Sie zeigt die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Δb_i , abgeleitet aus Naturdaten. Sie wurden überwiegend von modernen, großen Motorschiffen und Schubverbänden, die auf dem Rhein und Neckar fahren, gesammelt. Abbildung 5 beinhaltet alle Messungen ohne Unterscheidung der Randbedingungen. Die zur Ermittlung der Δb_i genutzte Methode ist eine Spektralanalyse der Längs- und Drehbeschleunigung während der Fahrt vieler beobachteter moderner Schiffe. Die Analysemethode erlaubt die Abspaltung der

niedrigsten Frequenzen, die durch zentrifugale Beschleunigungen in Kurven entstehen von denen, die den v.g. "Human-Factor" Effekten zugeordnet werden können, z.B. die Reaktion auf Instabilitäten des fahrenden Schiffes (Söhngen & Rettemeier 2013, Söhngen & Paprocki 2013). Die Kombination der Ergebnisse von Längs- und Drehbeschleunigungen und deren zeitliche Integration ergeben Einzelwerte dieser Zusatzbreiten, die anschließend statistisch analysiert wurden.

Die abgeleiteten Zusatzbreiten Δb_i liegen zwischen 0 und ungefähr 10 m mit einem Mittelwert bei ungefähr 3 m und einem Modalwert von ungefähr 2 m. Das heißt, dass ein guter Schiffsführer in der Lage ist, die Zusatzbreiten durch angemessene Manöver zu limitieren. Ein "typischer hoher Wert", gekennzeichnet durch das 75ste Perzentil von rund 4 m, stimmt gut mit dem Wert in den Deutschen Kanalrichtlinien (BMVBS 2011) für Begegnungsverkehr überein. Ein "typischer Spitzenwert", gekennzeichnet durch das 97ste Perzentil, welches oft für statistische Tests verwendet wird, liegt bei ungefähr 7 m. Auch dieser Wert findet sich in den deutschen Kanalrichtlinien für lange Strecken mit Richtungsverkehr, einem Fahrzustand, dem eine verminderte Aufmerksamkeit des Schiffsführers zugeordnet werden kann. Folglich muss die Zusatzbreite in einer solchen Situation größer als im Fall von Begegnungen sein, die kurze Manöversituationen sind, in denen davon ausgegangen werden kann, dass der Schiffsführer höchst aufmerksam ist. Jedoch kann ein solch hohes Aufmerksamkeitsniveau nicht über lange Zeit gehalten werden.

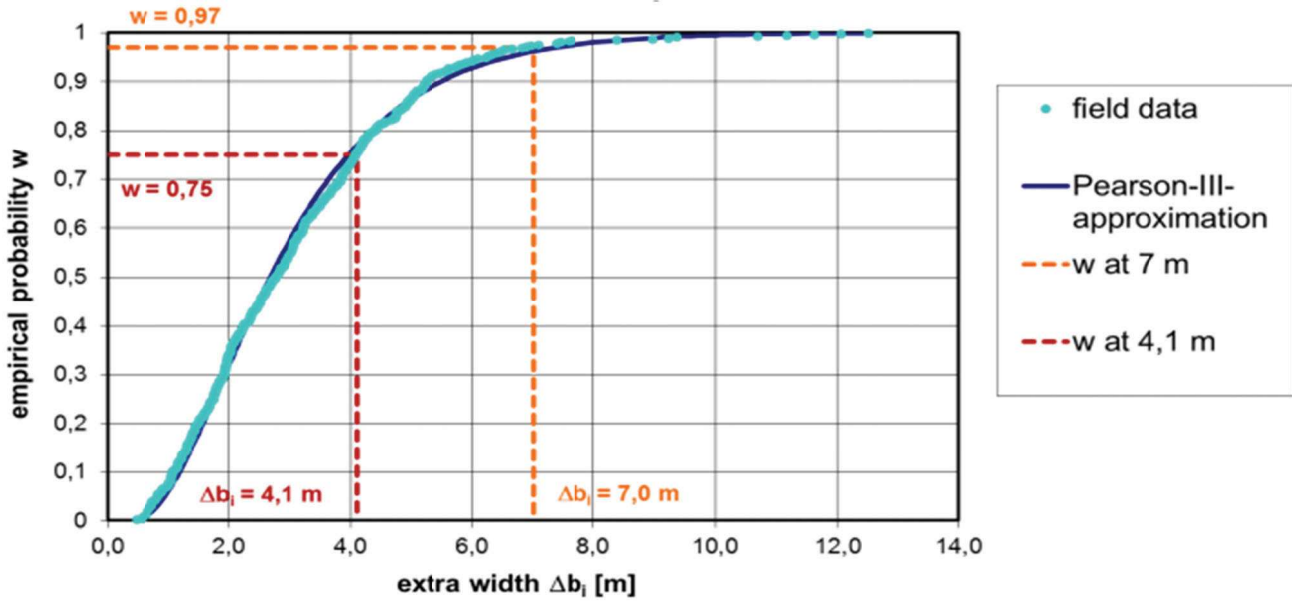


Abbildung 5: Wahrscheinlichkeitsverteilung der durch Instabilitäten und "Human-Factor" Effekte verursachten Zusatzbreiten, abgeleitet von beobachteten Schiffsfahrten auf Rhein und Neckar.

Leichtigkeits-kategorie	Bezeichnung	Angenommene Zusatzbreite Δb_i	Superpositionsmethode für Δb_i bei mehr als einem Schiff im Querschnitt	Entsprechende Annahmen zur Ableitung von Sicherheitsabständen mit und ohne Bugrudernutzung
A	Nahezu uneingeschränkt leichte Fahrt	ca. 7 m	Arithmetisch (Annahme, dass die Schiffsführer unabhängig voneinander agieren)	Manöver ohne jegliche Kooperation, keine Nutzung von Bugrudernanlagen notwendig
B	Moderat bis stark eingeschränkt leichte Fahrt	ca. 4 m	Statistisch (wie Standardabweichungen; Annahme, dass zwei große Δb_i gleichzeitig auftreten, gering ist)	Notwendigkeit zur Kooperation, aber generell keine Nutzung von Bugrudernanlagen notwendig
C	Stark eingeschränkt leichte Fahrt auf kurzen Strecken	ca. 2 m	Statistisch	Notwendigkeit zur Kooperation und zur Nutzung aller effizienten Rudernanlagen

Tabelle 1: Leichtigkeitskategorien nach PIANC INCOM WG 141 und mögliche Zuordnung von Zusatzbreiten durch Instabilitäten und ihre Superposition im Fall, dass sich mehr als ein Schiff im Querschnitt befindet (vorläufige Zahlen, entsprechend Abbildung 5), die zur Bewertung von Manövern in der Verkehrssimulation genutzt werden können (zusammen mit Annahmen zu Sicherheitsabständen und Bugstrahlrudernutzung).

Wenn wir diese Werte von Δb_i als einen ersten Ansatz zur Beschreibung von "Human-Factor" Effekten verwenden, wobei sie noch an die genannten Einflüsse wie Flusskrümmung und Fahrtrichtung angepasst werden müssen, können sie mit den Leichtigkeitskategorien verknüpft werden, wie sie in den zukünftigen Richtlinien von PIANC INCOM WG 141 (Deplaix & Söhngen 2013) definiert werden, zusammen mit der Methode ihrer Superposition im Fall von Begegnungen oder Überholmanövern. Der Ansatz basiert auf den Ergebnissen eines Vergleichs der berechneten benötigten Breite in geraden Kanälen mit denen in den deutschen und niederländischen Richtlinien für Richtungs- und Begegnungsverkehr und niedrige und hohe Verkehrsstärken. Dies ist in Tabelle 1 dargestellt, die in folgender Weise für die Verkehrssimulation genutzt werden kann:

- Da der Schiffsführer im Allgemeinen versucht, so unbeschränkt wie möglich zu fahren, kann in der Praxis angenommen werden, dass die genutzte Zusatzbreite in der ungestörten Fahrt die der höchsten Leichtigkeitskategorie "A" in Tabelle 1 entspricht (Spitzenwerte von Δb_i). Allen Manövern, die während eines Laufs der Simulation auftreten, in denen die verfügbare Breite größer ist als die benötigte Breite (berechnet durch Verwendung von Spitzenwerten von Δb_i), kann die Leichtigkeitskategorie "A" zugewiesen werden, die für den Rhein anzustreben ist. Auch die Entscheidung, ob ein Manöver von einem normal qualifizierten und aufmerksamem Schiffsführer vorgenommen wird oder nicht, kann auf Basis des Vergleiches der mit Spitzenwerten von Δb_i berechneten benötigten Breite

mit der zur Verfügung stehenden Breite des Fahrwassers erfolgen.

- Wenn während der Simulation eine Situation auftritt, z.B. da der gewählte Informationsradius des betrachteten Schiffes klein ist, in der die für den Leichtigkeitsstandard "A" benötigte berechnete Breite zu groß im Vergleich zur verfügbaren Breite ist, aber ausreichend im Fall eines Δb_i der Leichtigkeitskategorie "B" (hoch, aber keine Spitzenwerte von Δb_i), kann die Manöversituation mit der Kennung "B" versehen werden. Die Situation erfordert eine größere Aufmerksamkeit zur Durchführung des Manövers, aber ist ohne die Nutzung eines Bugstrahlruders möglich.
- Wenn die benötigte Breite durch die Verwendung des kleinsten Δb_i in Tabelle 1 verringert werden muss, um eine Berührung der seitlichen Grenzen des Fahrwassers zu vermeiden, kann die Leichtigkeit dieser besonderen Verkehrssituation mit der niedrigsten Kategorie "C" bezeichnet werden. Die Fahrt ist möglich, aber benötigt hohes Fahrkönnen und Aufmerksamkeit sowie – wenn verfügbar und wirksam – den Einsatz eines Bugstrahlruders. In noch engeren Situationen kann davon ausgegangen werden, dass eine Havarie auftreten kann.

Die zuvor beschriebene Vorgehensweise wird als erster Versuch zur Berücksichtigung von "Human-Factor" Effekten in der Verkehrssimulation verwendet, wobei die erwähnten Werte von Δb_i mit dem Forschungsschritt der BAW angepasst werden sollen. Außerdem ist eine Berücksichtigung von zufällig variierten Δb_i geplant.

2.2 Verhaltensmodell

Die longitudinale Verhaltenskomponente des Mikromodells für den Verkehr auf der Wasserstraße ist von einem weit verbreiteten Fahrzeugfolgmodell für den motorisierten Straßenverkehr abgeleitet. Fahrzeugfolgmodelle beschreiben die Reaktion des Fahrers in Form der Wunschbeschleunigung als Funktion des (Stoßstange-zu-Stoßstange) Abstands s zum vorausfahrenden Fahrzeug, der Geschwindigkeit v , und der Geschwindigkeit v_l des vorausfahrenden Fahrzeugs. Aufgrund seiner einfach zu interpretierenden Parameter und des glatten Beschleunigungsprofils wählen wir das Intelligent-Driver Model (IDM) von Treiber, M. et al. (2010) als Basismodell. Es wird durch die Beschleunigungsgleichung

$$\frac{dv(s, v, v_l)}{dt} = a_{\text{free}}(v) - a \cdot \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \quad (7)$$

beschrieben. Die freie Beschleunigungsfunktion

$$a_{\text{free}}(v) = a \cdot \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^4 \right] \quad (6)$$

modelliert eine Beschleunigung, die ihr Maximum bei Geschwindigkeit 0 hat und mit Annäherung an die Wunschgeschwindigkeit v_0 gleichmäßig gegen 0 geht. In den meisten Fällen wird diese Situation jedoch durch das Physik-Teilmodell aus Abschnitt 2.1 behandelt. Interessanter ist für unser Vorhaben die Wechselwirkungskomponente

$$a_{\text{int}}(s, v, v_l) = -a \cdot \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 =: -a \cdot z(s, v, v_l)^2, \quad (7)$$

welche die Absicht eines Fahrers oder Schiffsführers modelliert, dem vorausfahrenden Fahrzeug im gebundenen Verkehr mit einem dynamischen Abstand

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + \max \left[0, vT + \frac{v - v_l}{2\sqrt{ab}} \right] \quad (8)$$

zu folgen. Dieser setzt sich aus dem Minimalabstand s_0 für stehende Fahrzeuge, einer Zeitlücke T und einem dynamischen Beitrag, der die gleichmäßige Annäherung an ein langsames oder stehendes Fahrzeug mit einer komfortablen Verzögerung b ermöglicht, zusammen.

Es stellt sich heraus, dass eine leichte Abwandlung des IDM, das Improved IDM (IIDM) wie von Treiber, M. & Kesting, A. (2013) beschrieben, besser für den Verkehr auf Wasserstraßen geeignet ist. Ein Grund ist, dass das Entscheidungsmodell, wie später beschrieben, als Ergebnis eine kleinere Wunschgeschwindigkeit als die aktuelle Geschwindigkeit ergeben kann und das IDM in dieser Situation zu empfindlich reagiert. Das IIDM unterscheidet zwischen den Fällen $z < 1$ (die aktuelle Lücke ist größer als die gewünschte Lücke) und $z \geq 1$. Seine Beschleunigungsfunktion lautet

$$\frac{dv}{dt} \Big|_{v \leq v_0} = \begin{cases} a(1 - z^2) & z \geq 1 \\ a_{\text{free}}(1 - z^{2a/a_{\text{free}}}) & \text{sonst} \end{cases} \quad (9)$$

falls $v \leq v_0$. Wenn das Fahrzeug schneller als die Wunschgeschwindigkeit ist, ist die Beschleunigungsfunktion durch

$$\frac{dv}{dt} \Big|_{v > v_0} = \begin{cases} a_{\text{free}} + a(1 - z^2) & z \geq 1 \\ a_{\text{free}} & \text{sonst} \end{cases} \quad (10)$$

gegeben. In beiden Fällen wird die erweiterte freie Beschleunigungsfunktion

$$a_{\text{free}}(v) = \begin{cases} a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^4 \right] & \text{wenn } v \leq v_0 \\ -b \left[1 - \left(\frac{v_0}{v} \right)^{4a/b} \right] & \text{wenn } v > v_0 \end{cases} \quad (11)$$

verwendet. Dieses Modell hat den gleichen Parametersatz wie das IDM, die Wunschgeschwindigkeit v_0 , die Zeitlücke T , den Minimalabstand s_0 , die Maximalbeschleunigung a , und die komfortable Verzögerung b .

Durch Anpassung dieser Parameter können verschiedene Fahrstile modelliert werden. Typische Parameter für Binnenschiffe sind in Abschnitt 3.1 gegeben.

2.3 Kombination des Physik-Modells und des Verhaltensmodells

Wir verwenden eine Kombination des Improved Intelligent Driver Model wie in Abschnitt 2.2 beschrieben und des Physik-Teilmodells aus Abschnitt 2.1, um physikalische und Verhaltenskomponenten zu verknüpfen. Die physikalische Beschleunigung $a_{\text{max/min}}^{\text{phys}}$ bei maximaler und minimaler Maschinenleistung begrenzt die vom IIDM gegebene Beschleunigung a_{IIDM} :

$$a_{\text{Vessel}} = \max\left(a_{\text{min}}^{\text{phys}}, \min\left(a_{\text{max}}^{\text{phys}}, a_{\text{IIDM}}\right)\right). \quad (12)$$

Das Physik-Teilmodell kann durch Variation der Maschinenleistung beeinflusst werden, dass IIDM durch Variation der Wunschgeschwindigkeit.

Im freien Verkehr wird die Dynamik durch das Physik-Teilmodell beschrieben. Der Schiffsführer stellt die gewünschte Maschinenleistung ein und die Beschleunigung ist durch das Physikmodell gegeben. Infolgedessen ist die Geschwindigkeit auf die physikalisch höchstmögliche Geschwindigkeit begrenzt. Im IIDM ist die Wunschgeschwindigkeit auf unendlich gesetzt, daher verringert sich die vom IIDM gegebene Beschleunigung nicht mit wachsender Geschwindigkeit. Jedoch wird sie durch das Physikmodell beschränkt, wenn die physikalisch höchstmögliche Geschwindigkeit erreicht ist. Nähert sich das Schiff einem vorausfahrenden Schiff, übernimmt das IIDM und reduziert die Beschleunigung, um den Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug einzuhalten. Durch die Nutzung dieser Kombination von Physikmodell und IIDM werden freier und gebundener Verkehr komplett beschrieben. Während Begegnungen und Überholmanövern reduziert der Steuermann aktiv die Wunschgeschwindigkeit, um Konflikte zu lösen. Zur Einleitung eines Überholmanövers wird die Beschleunigung in Bezug auf das nächste vorausfahrende Fahrzeug anstelle des aktuell vorausfahrenden Fahrzeugs berechnet. Diese zwei Verkehrssituationen werden in den nächsten Abschnitten im Detail beschrieben.

2.4 Entscheidungskomponenten

2.4.1 Begegnungen

Wir nehmen an, dass der Bergfahrer die Begegnung durch Anpassung seiner Geschwindigkeit regeln muss. Wenn er die Begegnung nicht regeln kann, wird der Talfahrer ersucht, seine Geschwindigkeit auf die kleinstmögliche Geschwindigkeit zu reduzieren. Diese Situation tritt nur auf, wenn der Bergfahrer sich bereits in der Engstelle befindet und diese nicht verlassen kann, bevor der Talfahrer ihn erreicht. Die Engstellen werden durch den Vergleich von benötigter und vorhandener Fläche bestimmt (vgl. Abschnitt 2.1). Sie hängen von der Geschwindigkeit beider Schiffe ab. Um zu beurteilen, ob ein Konflikt gelöst werden kann, werden die Engstellen für diskrete Geschwindigkeitswerte der beteiligten Schiffe in jedem gegebenen Querschnitt bestimmt. Wir nehmen eine zeitlich konstante Geschwindigkeit beider Schiffe, Berg- und Talfahrer, an, um den Bereich zu bestimmen in dem die Begegnung stattfindet. Da wir die laterale Dynamik nicht modellieren, nehmen wir eine konstante Zeit für den "Spurwechsel" an, so dass der Bereich mit der Geschwindigkeit wächst. Beide Schiffe müssen auch während des Spurwechsels in den Querschnitt passen. Eine Veranschaulichung der raumzeitlichen Belegungsfläche ist in Abb. 6 dargestellt. Der Bergfahrer passt seine Geschwindigkeit an die größt-mögliche Geschwindigkeit an, mit der der Konflikt gelöst wird. Wenn der Bergfahrer den Punkt an dem der Spurwechsel beginnt bereits passiert hat, darf er seine Geschwindigkeit nur noch halten oder verringern. Der Schiffsführer setzt diese Geschwindigkeit als Wunschgeschwindigkeit im IIDM, die Beschleunigung wird nun in Bezug auf diese

Wunschgeschwindigkeit berechnet. Diese Entscheidung wird in jedem Zeitschritt überprüft und korrigiert.

Wenn mehr als ein Talfahrer entgegenkommt, muss der Bergfahrer alle Begegnungen auf einmal regeln, wenn die Begegnungsflächen räumlich überlappen wie in Abb. 7 gezeigt. Die Talfahrer werden zu einem virtuellen Schiff zusammengefasst, der Bergfahrer muss seine Geschwindigkeit anpassen.

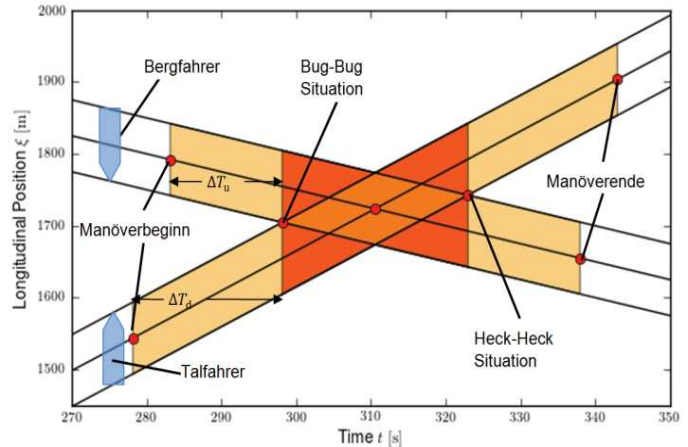


Abbildung 6: Raumzeitliche Belegungsflächen zur Veranschaulichung der Begegnungsstrategie. Wichtige Manöverpunkte sind gekennzeichnet. Das Manöver startet zurzeit $[\Delta T]_{u/d}$ vor der Bug-Bug Situation und endet die gleiche Zeitspanne nach der Heck-Heck Situation.

Der Bergfahrer passt seine Wunschgeschwindigkeit nur während der Manövervorbereitung an. Die Vorbereitung einer Begegnung ist beendet, sobald die Schiffe Bug an Bug liegen. Sobald das Manöver vorbereitet ist, wird es mit der aktuellen Wunschgeschwindigkeit durchgeführt. Der Erfolg des Manövers wird überwacht. Der Bergfahrer darf die Begegnung mit einem weiteren entgegenkommenden Schiff vorbereiten. Zu diesem Zeitpunkt wird der Talfahrer aus dem virtuellen Schiff entfernt, folgende Talfahrer bleiben darin. Die Geschwindigkeit des Talfahrers wird durch die physikalischen Grenzen begrenzt und, falls er einem anderen Schiff folgt, durch die Geschwindigkeit und den Abstand zu diesem Schiff. Wenn der Talfahrer mit minimaler Geschwindigkeit fahren musste, beschleunigt er erst nach Manöverende wieder.

2.4.2 Überholmanöver

Wenn ein Schiff einem vorausfahrenden Schiff folgt, kann der Schiffsführer entscheiden, dieses zu überholen. Dazu müssen zwei Kriterien erfüllt sein: Das Anreiz- und das Sicherheitskriterium.

Das Anreizkriterium ist in Form der Beschleunigung formuliert. Anstelle des aktuellen vorausfahrenden Schiffes, wird die Beschleunigung in Bezug auf das nächste vorausfahrende Schiff berechnet und mit der aktuell möglichen Beschleunigung verglichen. Wenn die neue Beschleunigung größer ist, ist der Anreiz zu überholen gegeben. Jedoch muss zunächst das Sicherheitskriterium betrachtet werden, bevor das Überholmanöver durchgeführt werden kann.

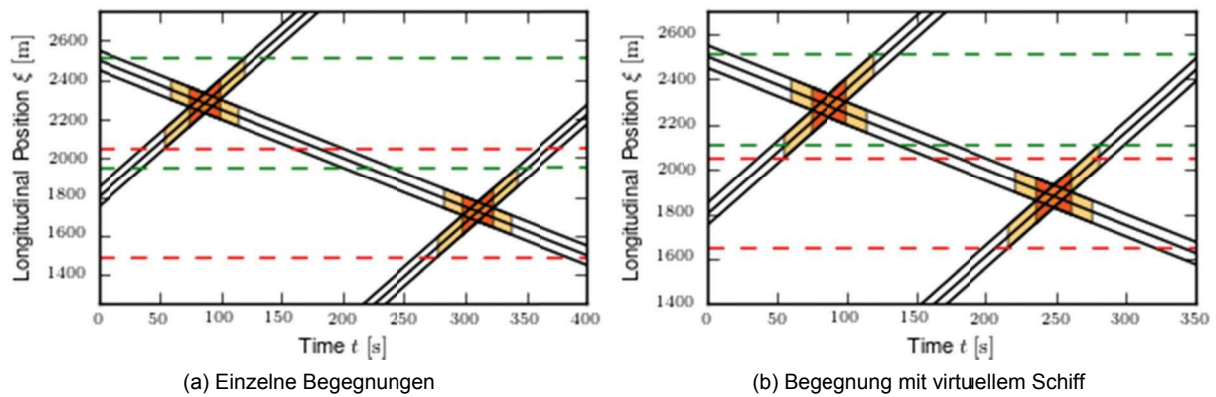


Abbildung 7: Raumzeitliche Belegungsflächen zur Veranschaulichung der Begegnungsstrategie im Fall von zwei (oder mehr) Talfahrern. Grün gestrichelte Linien beschreiben die obere und rot gestrichelte Linien die untere Grenze eines Begegnungsbereichs. Im Fall (a) überlappen die Bereiche der beiden Begegnungen nicht, sie werden einzeln vorbereitet, während die Bereiche im Fall (b) überlappen und die Schiffe zu einem virtuellen Schiff zusammengefasst und zeitgleich behandelt werden müssen.

Das Sicherheitskriterium ist der Berechnung der Engstellen während einer Begegnung ähnlich. Der für das Überholmanöver benötigte Bereich wird unter der Annahme konstanter Geschwindigkeit aller beteiligten Schiffe berechnet. Wie zuvor wird angenommen, dass Spurwechsel eine konstante Zeit benötigen. Ein Bergfahrer muss nicht auf ein entgegenkommendes Schiff reagieren, das gerade überholt. Es liegt in der Verantwortung des Überholers sicherzustellen, dass der benötigte Platz vorhanden ist. Wenn dies nicht der Fall ist, wird das Überholmanöver abgebrochen und der Bergfahrer muss die Begegnung regeln.

3. Simulation

In diesem Abschnitt nutzen wir das beschriebene Modell, um den Verkehr auf Fließgewässern in einem einfachen Szenario mit Begegnungsverkehr und einer einzelnen Engstelle zu simulieren.

3.1 Aufbau der Simulation

Zwei verschiedene Schiffstypen, groß (Typ 1) und klein (Typ 2), befahren das Fahrwasser eines Flusses mit einer Engstelle in der Mitte. Die Parameter der Schiffe sind in Tabelle 2 gegeben.

	Schiffstyp 1	Schiffstyp 2
Länge	110 m	85 m
Breite	11.45 m	9.5 m
Masse	3174 t	1817 t
Mittlerer Tiefgang	2.8 m	2.5 m
Maximaler Tiefgang	2.8 m	2.5 m
Wunschleistung (zu Berg)	1100 kW	900 kW
Wunschleistung (zu Tal)	330 kW	270 kW
Manöverzeit	20 s	20 s

Tabelle 2: Schiffsparameter

Die IIDM Parameter werden für beide Schiffstypen als identisch angenommen und sind in Tabelle 3 gegeben.

Die Parameter a und b sind so gewählt, dass sie typische Beschleunigungen des Physikmodells darstellen. Wir betrachten einen Flussabschnitt mit einer mittleren Tiefe von 4.5 m innerhalb der Fahrrinne, einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 2 m/s und mit einer 500 m langen Engstelle zwischen Flusskilometer 8 und 8.5. Die Engstelle zeichnet sich durch ein lokal verkleinertes Querprofil, verbunden mit einer erhöhten Fließgeschwindigkeit von 2.1 m/s, aus. Zwei große Schiffe (Typ 1) können die Engstelle nicht gleichzeitig befahren, jede andere Kombination von Schiffen ist jedoch möglich. Die Quellen und Senken für die Schiffe befinden sich bei Flusskilometer 3 und 13. Nur die Bergfahrer müssen die Begegnungen regeln und ihre Geschwindigkeit anpassen, d.h. nur sie sind von der Engstelle betroffen. Überholmanöver werden nicht betrachtet.

Zeitlücke T	90 s
Minimaler Abstand s_0	100.0 m
Wunschgeschwindigkeit v_0	$\infty \frac{m}{s}$
Maximale Beschleunigung a	$0.05 \frac{m}{s^2}$
Komfortable Verzögerung b	$0.02 \frac{m}{s^2}$

Tabelle 3: Typische IIDM Parameter für Binnenschiffe

Wir führen eine Reihe von Simulationen mit verschiedener Verkehrsnachfrage und Flottenstruktur in Berg- und Talfahrt durch. Die Engstellenkapazität definieren wir als den maximalen Schiffsfluss (Zahl der Schiffe die pro Zeiteinheit einen bestimmten Querschnitt vor der Engstelle passieren) den die Engstelle ohne Stauung erträgt und untersuchen, wie diese Kapazität von den zuvor genannten Einflussfaktoren abhängt. Um einen Stau der Bergfahrer zu detektieren wird als Kriterium verwendet, dass mindestens 5 dieser Schiffe langsamer sind als 40% der an der jeweiligen Position physikalisch höchstmögliche Geschwindigkeit bei freier Fahrt. Die Verkehrsnachfrage wird für die Talfahrer von 0 Fz/h bis 15 Fz/h variiert, die Nachfrage der Bergfahrer von 0 Fz/h bis 20 Fz/h. Jedoch wird ein Schiff dem Verkehr nur dann hinzugefügt, wenn genug Platz auf dem Fluss

ist, daher kann der reale Verkehrsfluss geringer als die eingestellte Nachfrage sein. Um den realen Verkehrsfluss als Funktion der lokalen Verkehrsdichte zu berechnen, werden Fluss-Dichte-Daten aggregiert, indem die Zahl der Schiffe und deren Geschwindigkeit in den Abschnitten von Flusskilometer 9 bis 10 und 10 bis 11 über Zeiträume von 30 Minuten gezählt und gemittelt wird.

Ergänzend zu den Fluss-Dichte-Daten, berechnen wir theoretische "Fundamentaldiagramme", die per Definition das Fließgleichgewicht von identischen Schiffen als eine Funktion der Dichte geben (Treiber, M. & Kesting, A. (2013)). Im Allgemeinen bestehen Fluss-Dichte-Daten und Fundamentaldiagramme aus zwei Regionen, dem freien Verkehr, gekennzeichnet durch kleine Dichten und mit der Dichte wachsendem Fluss und dem gebundenen Verkehr, gekennzeichnet durch einen mit der Dichte sinkenden Fluss. Die Steigung des freien Zweiges ist durch die freie Wunschgeschwindigkeit gegeben, welche die physikalisch größtmögliche Geschwindigkeit bei gegebener Wunschleistung ist. Das Fundamentaldiagramm wird an einer Stelle außerhalb der Engstelle für beide Schiffstypen und Richtungen berechnet.

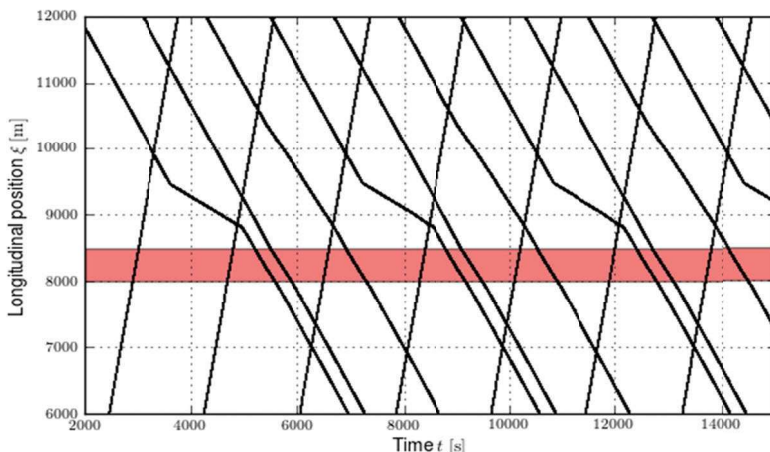


Abbildung 8: Typische Trajektorien von Schiffen, die sich in Gegenwart einer Engstelle (rot) begegnen. Die Bergfahrer müssen abbremsen um entgegenkommende Schiffe durchzulassen.

3.2 Ergebnisse der Simulation

Ein typisches Beispiel von Schiffstrajektorien ist in Abb. 8 gegeben. Der Fluss der Talfahrer ist so groß, dass einige Bergfahrer die Engstelle nicht direkt passieren können und davor die Geschwindigkeit reduzieren oder abstoppen müssen. Jedoch enthält diese Simulation noch nicht das Staukriterium, da zu gegebener Zeit höchstens ein Schiff langsamer fahren muss.

Die berechneten Fundamentaldiagramme sind in Abb. 9 (a-d) dargestellt. Wir erkennen die maximalen Flüsse an den Spitzen der Dreiecke und die Wunschgeschwindigkeiten an der Steigung der freien Zweige. Die Werte sind in Tabelle 4 gegeben.

	Typ 1 Zu Berg	Typ 1 Zu Tal	Typ 2 Zu Berg	Typ 2 Zu Tal
$Q_{\max} \left[\frac{\text{Fz}}{\text{h}} \right]$	15.4	26.2	19.3	27.8
$v_{\text{desired}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	1.47	4.58	1.94	4.87

Tabelle 4: Maximale Flüsse und Wunschgeschwindigkeiten für die verschiedenen Schiffstypen in beiden Fahrrichtungen, wie in den Fundamentaldiagrammen dargestellt.

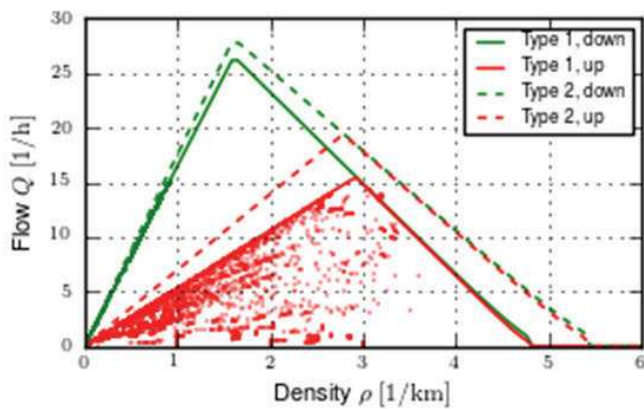
Die maximalen Dichten sind für beide Richtungen gleich, hängen aber vom Schiffstyp ab. Wir ermitteln $\rho_1^{\max} = 4.8 \text{ Fz/km}$ und $\rho_2^{\max} = 5.4 \text{ Fz/km}$.

Die Fluss-Dichte-Datenpunkte für verschiedene Verkehrszusammensetzungen sind in den gleichen Abbildungen wie die Fundamentaldiagramme gegeben. Im Fall der Talfahrer streuen die Punkte um den freien Zweig der Fundamentaldiagramme. Wenn der Verkehr aus beiden Schiffstypen besteht, sind die beiden freien Zweige und die Fläche dazwischen belegt. Je größer der Fluss der langsameren Schiffe vom Typ 1, desto mehr Punkte liegen bei großen Dichten auf dem freien Zweig des Fundamentaldiagramms vom Typ 1. Viele der Fluss-Dichte-Datenpunkte liegen innerhalb des Dreiecks, das durch die beiden Zweige und die ρ -Achse gebildet wird. Einige Datenpunkte streuen um die gebundenen Zweige. Mit wachsendem Anteil der Schiffe vom Typ 2, reichen die Fluss-Dichte-Daten des freien Verkehrs auch zu höheren Dichten, bis sie den gebundenen Zweig der Schiffe vom Typ 2 erreichen.

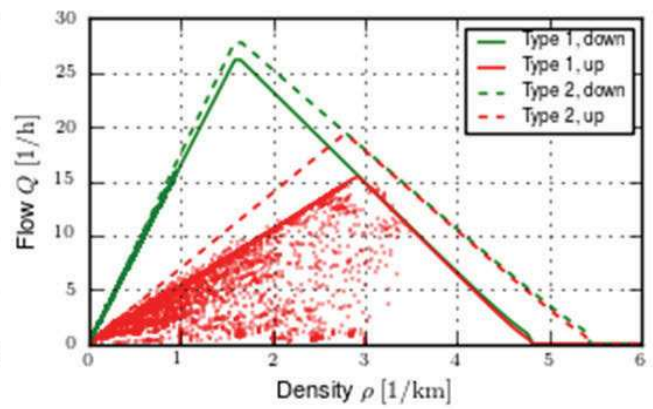
Obwohl die maximale Verkehrsnachfrage der Bergfahrer bei 20 Fz/h liegt, ist der reale Fluss kleiner, wie an den Fluss-Dichte-Daten zu sehen ist. Wenn der Verkehr nur aus Schiffen vom Typ 1 besteht, liegt der größte gemessene Fluss bei 14.25 Fz/h. Er vergrößert sich mit dem Anteil der Schiffe vom Typ 2 geringfügig.

In Abb. 10 (a-d) ist der Verkehrszustand für Kombinationen von unterschiedlichen Verkehrsnachfragen in Berg- und Talfahrt und verschiedene Verkehrszusammensetzungen gezeigt. Grüne Punkte entsprechen freiem, rote Punkte gestautem Verkehr. Nur Verkehrsnachfragen, die auch realisiert und in den Fluss-Dichte-Daten beobachtet wurden, sind in den Abbildungen berücksichtigt.

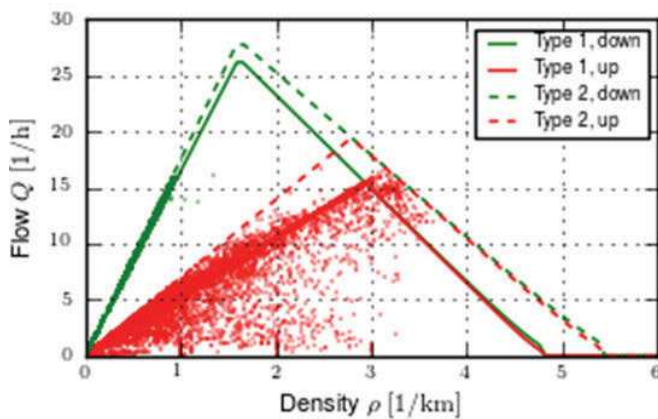
Wie in der Abbildung zu sehen ist, hängt die zuvor definierte Engstellenkapazität stark vom Fluss der Talfahrer ab. Je mehr Schiffe vom Typ 2 in der Verkehrszusammensetzung enthalten sind, desto stärker streut die Grenze zwischen gestautem und freiem Verkehr. Im Fall von 10% oder weniger von Schiffen des Typs 1 kann anhand der Abbildungen keine Engstellenkapazität definiert werden, zufällig verteilte Fluss-Kombinationen über $Q_{\text{up}} = 6 \text{ Fz/h}$ und $Q_{\text{down}} = 2.5 \text{ Fz/h}$ ergeben einen Stau.



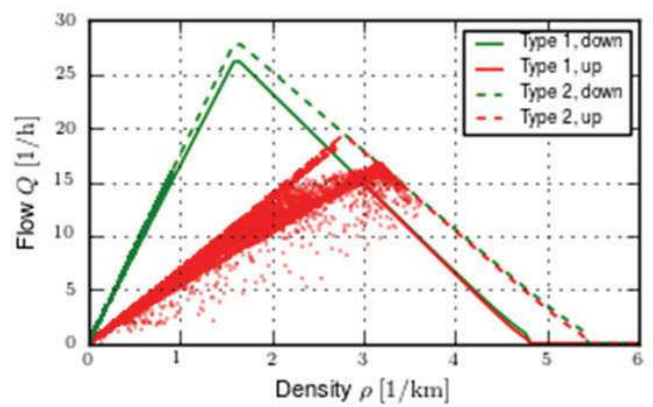
(a) Schiffstyp-Verhältnis 1:0



(b) Schiffstyp-Verhältnis 0.9:0.1



(c) Schiffstyp-Verhältnis 0.5:0.5



(d) Schiffstyp-Verhältnis 0.1:0.9

Abbildung 9: Fluss-Dichte-Daten (Symbole) und theoretische Fundamentaldiagramme (Linien) für beide Schiffstypen in Berg- (rot) und Talfahrt (grün) und für verschiedene Verkehrszusammensetzungen A:B der zwei Schiffstypen 1 (A) und 2 (B). Es gibt keinen gestauten Verkehr in der Talfahrt, daher keine Fluss-Dichte-Daten des gebundenen Verkehrs.

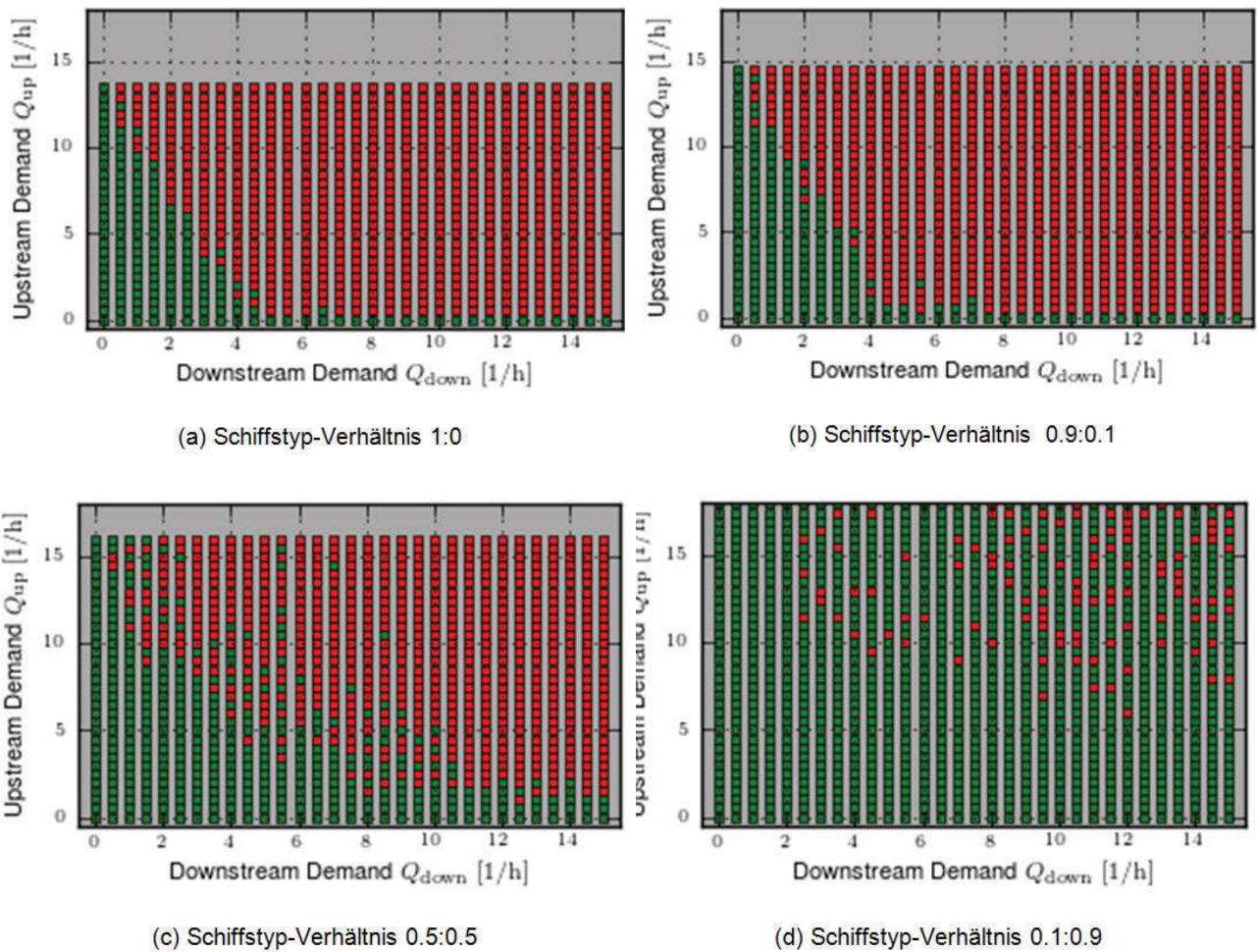


Abbildung 10: Phasendiagramme des freien und gestauten Verkehrszustands als Funktion der Verkehrsnachfrage in Berg- und Talfahrt (Fahrzeuge pro Stunde) und für verschiedene Verkehrszusammensetzungen A:B der zwei Schiffstypen 1 (A) und 2 (B).

3.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Fundamentaldiagramme zeigen die erwartete dreieckige Form. Sie unterscheiden sich, wie erwartet, für die verschiedenen Schiffstypen und Fahrrichtungen. Auf dem freien Zweig wird die Dynamik vom Physik-Modell bestimmt, während das IIDM auf dem gebundenen Zweig überwiegt. Dies erklärt die ähnliche Form der gebundenen Zweige für beide Fahrrichtungen eines Schiffstyps. Die freie oder physikalisch mögliche Geschwindigkeit, gegeben durch die Steigung des freien Zweigs, ist für Talfahrer größer als für Bergfahrer. Die maximale Dichte entspricht den erwarteten maximalen Dichten $\rho_{max}^i = 1/(s_0 + l_i)$ mit der Länge l_i des Schiffstyps i .

Die gemessenen Fluss-Dichte-Daten der Talfahrer streuen um den freien Zweig. Dies zeigt, dass diese Schiffe nicht durch die Engstelle beeinflusst werden. Nur Bergfahrer müssen Begegnungskonflikte lösen, so dass gebundene Verkehrszustände auftreten. Die Bergfahrer können alle Begegnungskonflikte lösen, die Talfahrer müssen nicht langsamer werden, da alle Fluss-Dichte-Daten auf dem freien Zweig liegen. Es treten demnach keine kritischen Situationen auf.

Die Schiffe vom Typ 2 werden durch die Schiffe vom Typ 1 ausgebremst, wie an den Fluss-Dichte-Daten in

Abb. 9 (c) und (d) gesehen werden kann. Obwohl die Zahl der Schiffe vom Typ 2 groß ist, liegen die Datenpunkte auf dem freien Zweig der Schiffe vom Typ 1. Dies zeigt die langsamere Geschwindigkeit. Wir erwarten, dass dieser Effekt durch die Erlaubnis von Überholmanövern reduziert werden würde.

Datenpunkte innerhalb des Fundamentaldiagramms stellen gemischte Zustände von freiem und gebundenem Verkehr dar. Ursache sind die Aggregation der Daten und dynamische Effekte.

Als ein Hauptergebnis beobachten wir, dass die Engstellenkapazität stark vom Fluss der Talfahrer und der Verkehrszusammensetzung abhängt. Während bei reinem Bergfahrerverkehr die theoretische Kapazität über 15 Fz/h liegt, fällt sie bei einem talfahrenden Fluss von gerade einmal 1 Fz/h und einem Verkehr der nur aus Schiffen vom Typ 1 besteht auf 10 Fz/h ab. Ein Fluss von $Q_{down} \approx 5$ Fz/h ist groß genug, um die Engstelle für Bergfahrer komplett zu blockieren. Je mehr Schiffe vom Typ 2 die Verkehrszusammensetzung beinhaltet, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit einer Lücke die groß genug ist, dass ein Bergfahrer die Engstelle passieren kann. Das Ergebnis ist eine größere Engstellenkapazität und die beobachtete unscharfe Grenze zwischen freiem und gestautem Verkehr.

4. Fazit

In unserem Beitrag haben wir gezeigt, wie eine mikroskopische, vieldynamische Simulation des Verkehrsflusses auf Binnenwasserstraßen durch die Kombination von Modellen verschiedener Forschungsrichtungen entworfen und implementiert werden kann. Ein neues Entscheidungsmodell zur Bewältigung von Begegnungen und Überholmanövern wurde eingeführt und "Human-Factor" Effekte wurden betrachtet. Da das Modell modular formuliert wurde, ist es möglich andere Physik-Modelle oder Verfahren zur Berechnung der Zusatzbreiten zu verwenden und es so an andere Schiffstypen anzupassen.

Durch unseren mikroskopischen Ansatz ist das Modell imstande, heterogenen Verkehr mit verschiedenen Arten von Schiffen und Charakteren von Schiffsführern zu simulieren. Es kann untersucht werden, wie Änderungen an der Fluss-Infrastruktur wie Fahrrinntiefen und -breiten, Änderungen am Pegel, verschiedene Flottenstrukturen oder sogar neue Schiffstypen den Verkehrsfluss beeinflussen.

Durch die Verwendung eines semi-empirischen Ansatzes zur Berechnung der Zusatzbreiten sind wir in der Lage, verschiedene Lösungen von Konflikten in Verkehrssituationen zu modellieren. Es ist sogar möglich, "Human-Factor" Effekte zu berücksichtigen und die Schwierigkeit eines Manövers im Rahmen einer Leichtigkeitskategorie zu bewerten.

Abschließend haben wir einen simulierten Nachweis der Arbeitsweise des Modells gegeben und gezeigt, welche Art von Daten berechnet werden kann. Als ein letztes Ergebnis haben wir herausgefunden, dass die Kapazität einer Engstelle sehr dynamisch ist und stark von der Flottenstruktur und dem Anteil der Talfahrer abhängt.

Um die Entscheidungsmodelle zu validieren und die Modellparameter zu kalibrieren, werden reale Daten der Trajektorien von Begegnungen und Überholmanövern benötigt. Ergänzend ist weitere Forschung nötig, um statistische Daten zu Schiffstypen, Verkehrszusammensetzung und Ankunftsverteilungen zu erhalten.

Literatur

BMVBS, (2011). Guidelines on standard cross sections of inland navigation channels, Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development, Germany, 2011

Dai, M.D.M. & Schonfeld, P. (1991). Simulation of Waterway Transportation Reliability. Transportation Research Record 1313 (98)

Deplaix, J.-M., Söhngen, B. (2013). Workshop Design Guidelines for Inland Waterways - Safety and Ease Standards (PIANC-INCOM WG 141). Smart Rivers Conference 2013

Helbing, D. (2001). Traffic and related self-driven many-particle systems. Rev. Mod. Phys. 73 (1067)

Rettemeier K. (2013). Workshop Design Guidelines for Inland Waterways - Review of Existing Guidelines (PIANC-INCOM WG 141). Smart Rivers Conference 2013

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

Söhngen B., Rettemeier K. (2013). Design Guidelines for Inland Waterways. (PIANC INCOM WG 141)

Söhngen, B., Rettemeier, K. (2013). Workshop Design Guidelines for Inland Waterways - Concept Design Method (PIANC-INCOM WG 141), Smart Rivers Conference 2013

Söhngen, B., Paprocki, M., KLIWAS-TP 4.4/2013, Schlussbericht, Mindestbreiten der Fahrrinnen für eine sichere und leichte Schifffahrt. BMVI, Koblenz 2013

Söhngen, B., Paprocki, M., Feierfeil T., Orlovius A., Leismann K. (2014). „Abladeoptimierung Mittelrhein, Schlussbericht zum Fahrrinnenbreitenbedarf“. BAW, to appear

Thiers, G. F. & Janssens, G. K. (1998). A Port Simulation Model as a Permanent Decision Instrument. SIMULATION 71 (117)

Treiber, M., Hennecke, A. & Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. Phys. Rev. E 62 (1805)

Treiber, M. & Kesting, A. (2013). Traffic Flow Dynamics. Data, Models and Simulation. Springer. ISBN 978-3-642-32459-8.

UFC (2005). Unified Facilities Criteria, Design: Mooring, UFC 4-159-03. US Army Corps of Engineers. 3 October 2005

VBW (2013). Fahrdynamik von Binnenschiffen, Fahrverhalten auf Binnenwasserstraßen. Fachausschuss Binnenwasserstraßen und Häfen (VBW/HTG) und Fachausschuss für Binnenschiffe (VBW/STG). Germany, 2013

Wassermann, S., Söhngen, B., Dettmann T., Heinzelmann C. (2010). Investigations to define minimum fairway widths for inland navigation channels. PIANC World Congress Liverpool, UK, 2010

Yee-Chung, Jin (1990). A study of flow in curved open channels. University of Alberta. Dep. Of Civil Engineering. 1990

Verfasser

Dipl.-Phys. Nicolas Fischer

Technische Universität Dresden
Institut für Wirtschaft und Verkehr
Würzburger Str. 35
01187 Dresden
Tel.: 0351/463-36726
E-Mail: Nicolas.Fischer@tu-dresden.de

Dr. Martin Treiber

Technische Universität Dresden
Institut für Wirtschaft und Verkehr
Würzburger Str. 35
01187 Dresden
Tel.: 0351/463-36794
E-Mail: Martin.Treiber@vwi.tu-dresden.de

Dr.-Ing. Bernhard Söhngen

Bundesanstalt für Wasserbau
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe
Tel.: 0721/9726-4600
E-Mail: Bernhard.Soehngen@baw.de

Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen: Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

Dr. Sebastian Kofalk,

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Dipl.-Ing. Stefanie Wienhaus,

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Prof. Dr. Hans Moser,

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Dr. Annegret Gratzki,

Deutscher Wetterdienst, Offenbach

Dr. Hartmut Heinrich,

Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Dr.-Ing. Harro Heyer,

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Zusammenfassung

Im Forschungsprogramm KLIWAS, initiiert durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI, ehemals BMVBS), wurden von Klimaszenarien abgeleitete Projektionen gerechnet. Das Programm bestand aus 30 Projekten, in denen technische, ökosystemare und managementbezogene Aspekte betrachtet wurden, um die klimabedingten Auswirkungen auf Wasserstraßen in Hinsicht auf Wassermengen und Gewässerqualität für die erste und die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts abzuschätzen. Ziel war es, ökologisch und ökonomisch geeignete Anpassungsmaßnahmen an mögliche zukünftige Zustände zu entwickeln. Mit anderen Forschungsprogrammen in Deutschland und der EU wurde kooperiert, auf der Arbeitsebene außerdem mit Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen sowie diversen Auftragnehmern. Im Folgenden wird ein Überblick gegeben über einige Ergebnisse zu bedeutenden deutschen Binnenwasserstraßen (Rhein, Elbe, Donau) und den Küstengewässern sowie zum Ansatz für Entscheidungen über Anpassungsmaßnahmen.

Die Projektionen zeigen, dass die klimabedingten Auswirkungen auf die Wassermenge, die Gewässergüte und die Gewässerökologie in der nahen Zukunft (2021 - 2050) moderat ausfallen werden, z. B. die Abflüsse und der mittlere Meeresspiegelanstieg. Für die ferne Zukunft (2071 - 2100) wurden allgemein stärkere Auswirkungen ermittelt. Parallel zu den Projektionen wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, mit denen gezeigt werden kann, wie sich wasserbauliche und andere technische Maßnahmen als Anpassungsmöglichkeiten auswirken. Nicht minder wichtige Anpassungsmöglichkeiten erfordern eine Veränderung bestehender Managementkonzepte, oder die Einführung innovativer Techniken, auch seitens der verladenden Wirtschaft und der Schifffahrt. Aus Sicht der Forschung ist die Bildung von Modell-Ensembles und Plausibilitätstests der Ergebnisse unverzichtbar. Schließlich sind die Anpassungsnotwendigkeiten zu priorisieren und Entscheider müssen sich vergegenwärtigen, dass Projektionen keine Wahrscheinlichkeiten liefern, sondern nur mögliche Szenarien darstellen.

Nun liegt es am Ministerium und der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV), die die Wasserstraßen unterhält, ihre Sicht auf die Bandbreite der Projektionen und damit auf den konkreten Handlungsbedarf im Sinne von erforderlichen Investitionen in Anpassungsmaßnahmen sowie den Zeitpunkt dafür zu bestimmen. In einer ersten Reaktion sieht man in der nahen Zukunft (2021 - 2050) keinen oder nur geringen Bedarf, das operative Geschäft des Betriebs- und der Unterhaltung der Wasserstraßen zu ändern. Die bestehenden Kapazitäten seien ausreichend, um zu reagieren und die Wirtschaftsleistung der Wasserwege zu garantieren. Für die ferne Zukunft (2071 - 2100) deuten sich markantere Änderungen an. Für Bauwerke mit langer Nutzungsdauer, die bereits heute zu dimensionieren sind, werden die Ergebnisse einer genaueren Prüfung unterzogen. "Climate-services" werden dauerhaft benötigt, um in regelmäßigen Zyklen die Planungen mit neuen Projektionsrechnungen zu unterstützen.

1. Hintergrund und Ziel

Bei Betrachtung der Verteilung des gesamten Transportvolumens in Deutschland auf die Verkehrsträger („modal split“) entfällt auf die Bundeswasserstraße ein bedeutender Anteil. Der Rhein ist die meistbefahrene Wasserstraße in Europa, er verbindet wichtige Wirtschaftszentren. Die Elbe und die Donau sind ebenso wichtige Teile des europäischen Wasserstraßennetzes. Die großen deutschen Seehäfen, wie Hamburg und Bremen, sind direkt an das Netz der Bundeswasserstraßen angebunden. Der Schiffsverkehr auf der Nordsee umfasst alle vorkommenden Arten und Größen von Wasserfahrzeugen. Der obere Rand der Größenklassen reicht bis zu Containerschiffen von 400 m Länge und 16 m Tiefgang. Der Umfang der Größenklassen ergibt einen sehr unterschiedlichen Grad an Betroffenheit und erfordert deshalb Informationen über die gesamte Spannweite der Zustandsgrößen der Schifffahrtsstraßen im Küstenbereich.

Die aktuellen wirtschaftlichen Aktivitäten auf den Meeren und insbesondere der Ausbau der Offshore - Windenergie in der Deutschen Bucht, haben mittlerweile das Spektrum des klimatologischen Informationsbedarfs erweitert. Für die ökonomische Planung eines Windparks sind die langfristigen möglichen Windausbeuten von Interesse. Die Standsicherheit der Bauwerke hängt sowohl vom Niveau der mittleren Veränderungen als auch von den Extremen ab.

In Folge des 2007 veröffentlichten 4. Sachstandsberichts des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) über den zu erwartenden Klimawandel stellten die Nutzer der Wasserstraßen die Frage, ob die Wasserstraßen auch weiterhin ein verlässlicher Verkehrsträger seien. Die Entscheidungsträger im BMVI und in der WSV benötigten darauf hin belastbare Informationen für nachhaltige Entscheidungen über Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel sowie den Zeitpunkt für das Inkrafttreten möglicher Maßnahmen. Im Fokus standen folgende Aspekte:

- Identifikation der möglichen Veränderungen der ozeanografischen und hydrologischen Bedingungen
- Analyse der Auswirkungen auf die Ästuar- und auf die Zufahrten zu Seehäfen

Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

- Identifikation der möglichen Veränderungen des Abflussverhaltens und der saisonalen Wasserstandsänderungen von Binnenwasserstraßen
- Abschätzung der möglichen Veränderungen des Sedimenthaushalts und der Flussbettentwicklung als Voraussetzung für die Sicherstellung der Mindestfahrinnenbreiten und –tiefen für die Schifffahrt
- Abschätzung der Entwicklung relevanter ökologischer Indikatoren und der Gewässergüte hinsichtlich künftiger Unterhaltungsmaßnahmen

programms spiegelten dies wieder. Ein Vorhaben lieferte die klimatologischen Daten, zwei Vorhaben befassten sich mit ozeanografischen Änderungen und möglichen Folgen des Klimawandels für die Küsten- und Seeschifffahrt. Zwei weitere Vorhaben untersuchten die Entwicklung der hydrologischen Regime, des Sedimenthaushalts sowie auch qualitative und ökologische Aspekte der Binnenwasserstraßen (Abbildung 1). Wasserbauliche Anpassungsoptionen wurden an ausgewählten konkreten Beispielen im Küstenbereich und am Mittelrhein betrachtet.



Abbildung 1: Mitteleuropäische Flusseinzugsgebiete und die größten deutschen Wasserstraßen

Diese Themen waren Gegenstand der Arbeiten des BMVI-Ressortforschungsprogramms KLIWAS¹ – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen. Dabei wurden unterschiedliche Klimawandelszenarien angenommen, Unsicherheiten der Klimamodelle analysiert und die Bandbreiten von Ensemble-Simulationen aufgezeigt (siehe PIANC MMX Deutsche Beiträge, KOFALK et al. 2010).

Die Verkehrsfunktion eines Flusses lässt sich nicht ausschließlich über die Wassermenge, die Geometrie und die Schiffsgröße definieren. Fünf thematisch ineinandergreifende Vorhaben des Forschungs-

2. Methode

Hydrologische und ozeanografische Prozesse laufen auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen ab und unterliegen komplexen Interaktionen. Fast alle Klimaprojektionen in den Modell-Ensembles basieren auf dem Emissionsszenario A1B, das moderat gesteigerte anthropogene Treibhausgas-Emissionen annimmt (Tabelle 1). Es wurden zwei Zeiträume betrachtet: die „nahe Zukunft“ (2021 – 2050) und die „ferne Zukunft“ (2071 – 2100). Für Vergleiche mit dem gegenwärtigen Zustand dienten im Allgemeinen Modellwerte (simulierte Werte) aus der Referenzperiode 1961 - 1990. In die Klimamodellierung für den Küstenbereich und die Ästuare sind außerdem Projektionen aus gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen eingegangen.

Die Ergebnisse vieler globaler und regionaler Klimamodelle wurden gleichermaßen für die mitteleuro-

¹ Das Forschungsprogramm KLIWAS wurde durchgeführt von der BfG, dem DWD, dem BSH und der BAW von 2009 - 2013. Ihre wissenschaftlichen Kompetenzen wurden ergänzt durch zahlreiche Kooperationspartner internationale anerkannter Forschungseinrichtungen.

Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

päischen Flusseinzugsgebiete in einem Ensemble von Klimaprojektionen zusammengeführt (www.kliwas.de). In der Folge ergibt sich eine Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungen. Dieser sogenannte Multi-Modell-Ansatz dient dazu, die Belastbarkeit des derzeitigen Kenntnisstandes zu bewerten.

Um die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf das System Wasserstraße ganzheitlich abschätzen zu können, fand in KLIWAS ein interdisziplinärer, wissenschaftlicher Austausch statt, der in der Entwicklung und Anwendung durchgängiger Modelketten mündete, die auch ökologische und ökonomische Aspekte umfassten (Abbildung 2 und 3).

Das Ensemble der Klimaprojektionen "trieb" eine Reihe von Wirkungsmodellen an, die letztlich die für die Entscheidungsträger relevanten Kennwerte ausgaben, z. B. Kennwerte für Niedrigwasserabflüsse. Plausibilitätsprüfungen engten diese Bandbreite ein und erleichtern so die anschließende Entscheidungsfindung. Die Abbildung 4 zeigt eine beispielhafte Darstellung der Ergebnisse für ein Ensemble der Niedrigwasserabflüsse (NM7Q) für den Pegel Kaub (Rhein-km 546, Mittelrhein) im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Okt; NILSON et al. 2014). Die statistischen Parameter beschreiben das Ensemble und dienen dem Vergleich mit anderen Ensembles oder mit dem Szenarienkorridor.

Um denkbare wasserbauliche Anpassungsoptionen zu analysieren, wurden parallel zu den Projektionen Sensitivitätsanalysen für extreme Situationen durchgeführt. Dabei dienten Annahmen zu zukünftigen Änderungen des für das Wasserstraßenmanagement wichtigen „gleichwertigen Abflusses“ (GLQ) oder ein bestimmter Anstieg des Nordsee-Meeresspiegels als Eingangsgrößen; Abbildung 5 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Für die Einordnung in das Spektrum der möglichen „Zukünfte“ können die Entscheider die angenommenen Änderungen der Sensitivitätsanalyse in die Ergebnisbandbreite der Projektionen in Beziehung setzen.

Emissions-szenario	Globales Klimamodell (GCM)	Regionales Klimamodell (RCM)	Quelle (Institution)	Originaldaten/ finanziert durch
Hindcast	ERA40_	CLM2.4.6	ETHZ	EU-FP6 ENSEMBLES
Hindcast	ERA40_	REMO5.7	MPI-M	EU-FP6 ENSEMBLES
Hindcast	ERA40_	RM4.5	CNRM	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_	BCM2_	RCA3	SMHI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_	ECHAM5r1_	CLM2.4.11	GKSS	BMBF
A1B_	ECHAM5r3_	RACMO2	KNMI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_	ECHAM5r3_	REMO5.7	MPI-M	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_	HadCM3Q0_	CLM2.4.6	ETHZ	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_	HadCM3Q0_	HadRM3Q0	METO-HC	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_	ECHAM5r3_	HIRHAM5	DMI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_	ECHAM5r3_	RegCM3	ICTP	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_	HadCM3Q16_	RCA3	C4I	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_	ECHAM5r3_	RCA3	SMHI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_	HadCM3Q3_	RCA3	SMHI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_	ECHAM5r2_	CLM2.4.11	GKSS	BMBF
A1B_	ARPEGE_	RM5.1	CNRM	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_	ARPEGE_	HIRHAM5	DMI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_	BCM2_	HIRHAM5	DMI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_	HadCM3Q3_	HadRM3Q3	METO-HC	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_	HadCM3Q16_	HadRM3Q16	METO-HC	EU-FP6 ENSEMBLES

Tabelle 1: Modell-Ensemble für Binnenwasserstraßen / Flusseinzugsgebiete, verwendet in KLIWAS zur Projektion der Parameter "Lufttemperatur", "Niederschlag", "Globalstrahlung" und "relative Feuchte" in postprozessierten Rasterdaten (Plagemann et al. 2014)

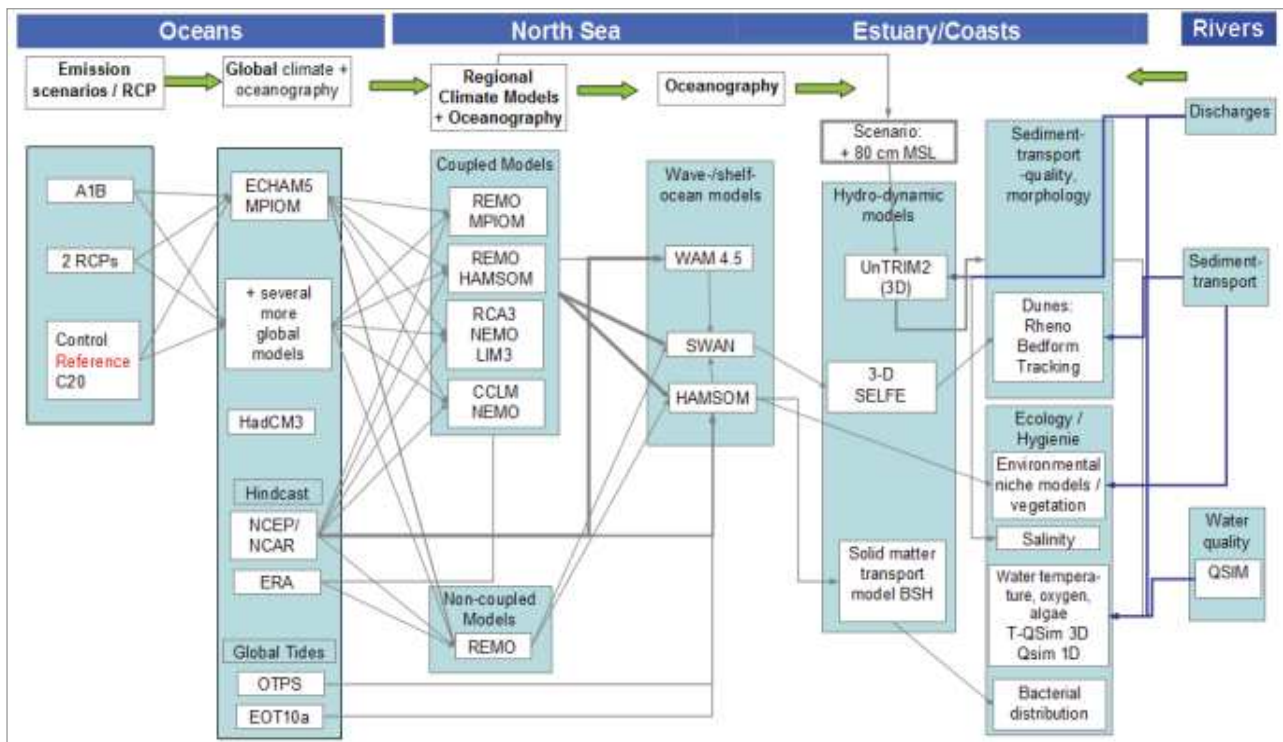


Abbildung 2: Modellkette Küste/See

Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

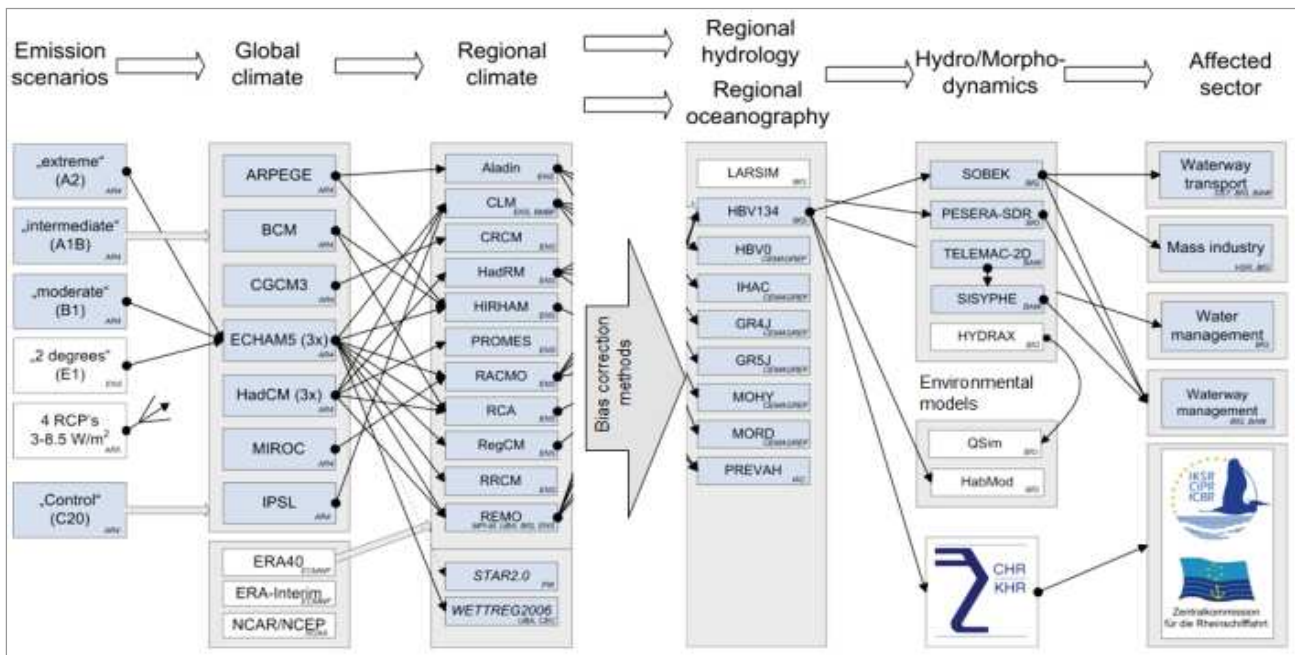


Abbildung 3: Modellkette Binnenwasserstraßen (Nilson et al. 2014)

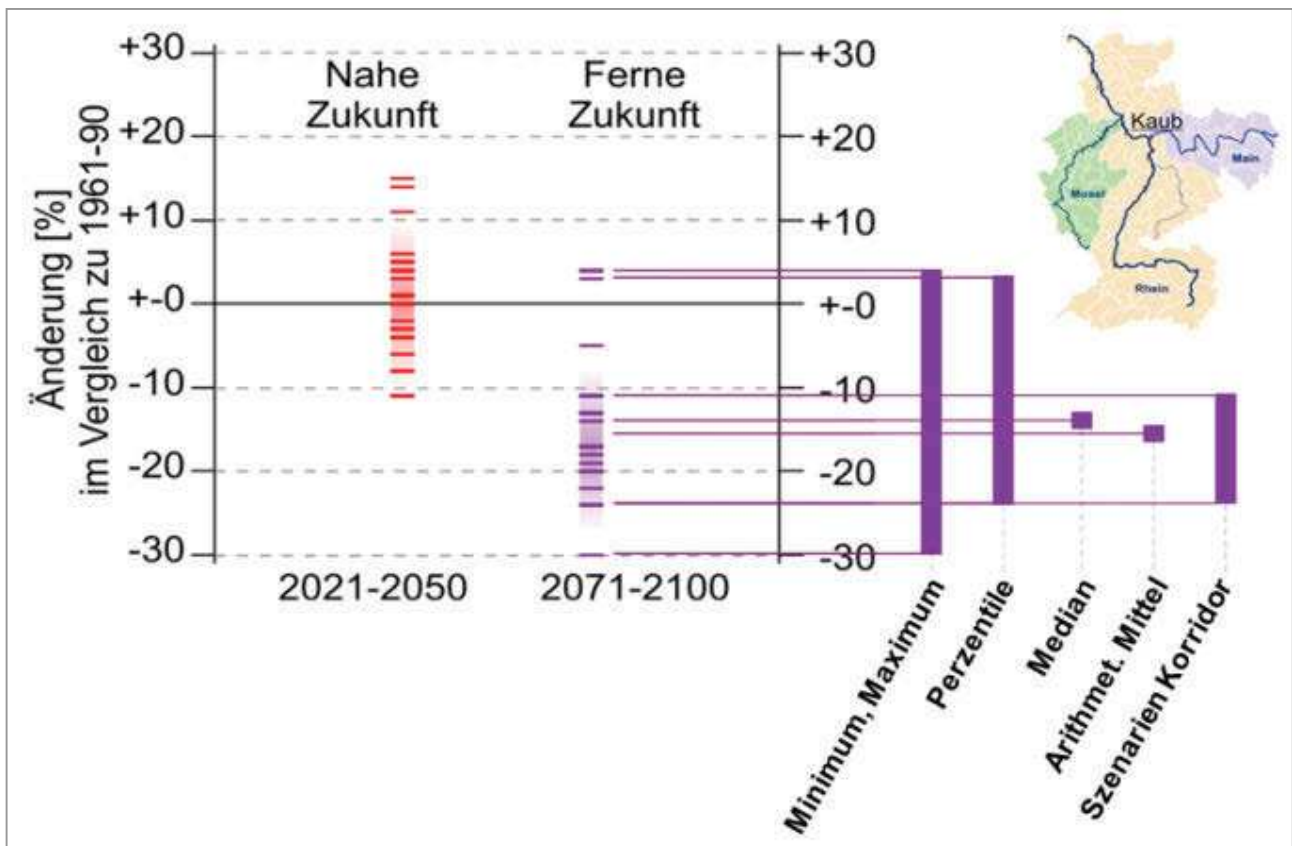


Abbildung 4: Beispiel-Diagramm zur Darstellung einer Bandbreite und Schema zur Beschreibung eines Ensembles inklusive des Szenarienkorridders (Nilson et al. 2014)

Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

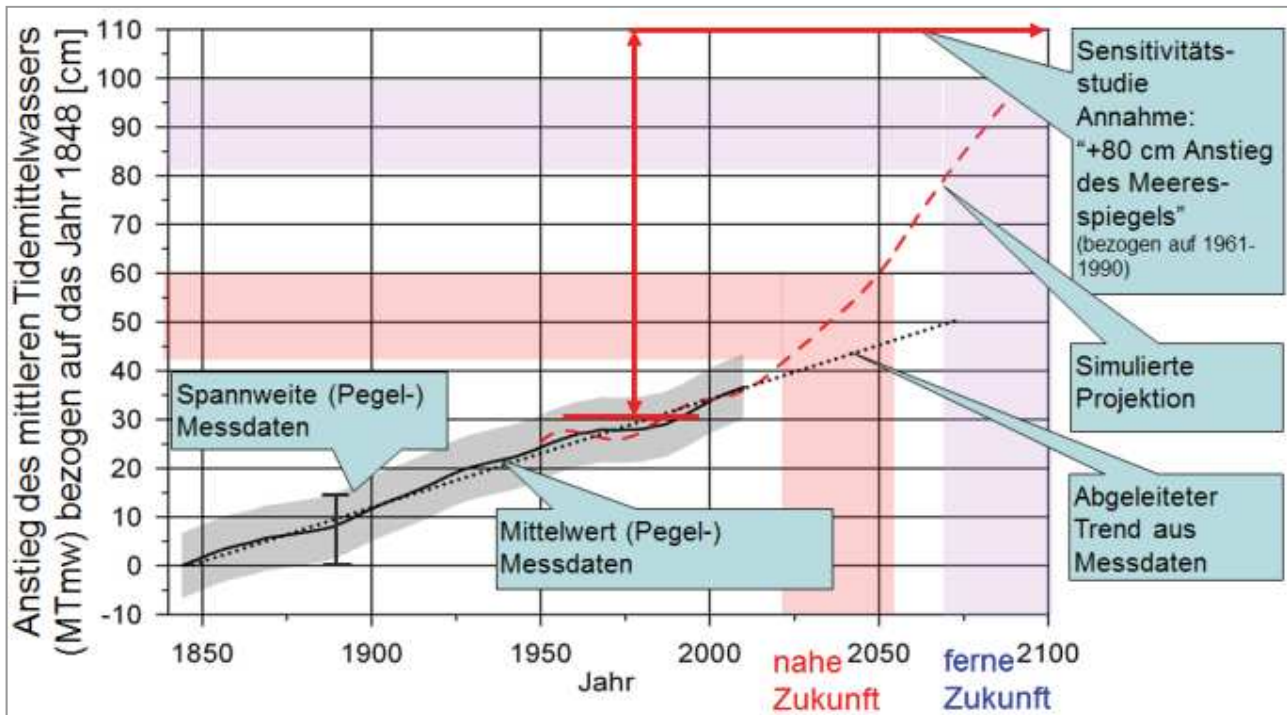


Abbildung 5: Schematischer Zusammenhang von Messdaten, Trends, Projektion und Sensitivitätsstudie am Beispiel Meeresspiegelanstieg (Trend und Messdaten aus HEIN et al. 2014)

3. Klimatische Auswirkungen auf das deutsche Wasserstraßensystem und Optionen zur Anpassung

3.1 Ausgewählte Ergebnisse für den Küstenbereich und die See

Neue Klimatologien für den Küstenbereich wurden entwickelt. Sie beruhen auf qualitätsgesicherten Beobachtungsdaten und stellen eine verbesserte Grundlage für den Einsatz und die Bewertung von Klimamodellen dar (BÜLOW ET AL. 2014). Es wurde festgestellt, dass die möglicherweise geringfügigen Änderungen in der Windrichtung, beträchtliche Auswirkungen auf den Seegang haben werden. Windrichtung und Windstärke unterliegen einer hohen Variabilität. Signifikant positive wie negative Trends für den Zeitraum 1961 bis 2100 sind jedoch so gering, dass man keine einheitlichen Aussagen treffen kann. In der westlichen Nordsee wird die signifikante Wellenhöhe (SWH) um ca. -10 % abnehmen, in der östlichen Nordsee um ca. +8 % zunehmen. In der Folge verändern sich auch die maximalen Wellenhöhen, -8 % in der westlichen und +5 % in der östlichen Nordsee. Bei den für den Bau und den Betrieb von Windparks wichtigen Schönwetterfenstern deuten sich keine Änderungen an. Wie beim Wind spielt auch beim Seegang die dekadische Variabilität eine große Rolle.

Der eigene Beitrag der Nordsee zum Meeresspiegelanstieg beschränkt sich auf die -sehr geringe- Volumenzunahme durch die Temperaturerhöhung des Meerwassers. Der Hauptbeitrag zum Anstieg in der Nordsee wird in den Ozeanen generiert und in die Nordsee transferiert.

Zusammenfassend ist zu erklären, dass unter der Voraussetzung des Eintretens des Treibhausgasszenarios A1B der Klimawandel nicht zu Problemen für die Seeschifffahrt führen wird. Bedeutend werden allerdings die Auswirkungen auf die Ökologie der Nordsee sein. Im

Laufe der Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass die Schwankungen in den klimatischen Parametern stark von einer dekadischen Variabilität dominiert werden, die von einer Kategorisierung in eine „nahe Zukunft“ und eine „ferne Zukunft“ ungenau beschrieben wird.

Der mittlere Anstieg des mittleren Tidemittelwassers (Tmw) beträgt über die vergangenen 100 Jahre an den Mündungspegeln der Nordseeästuar +1,6 mm bis +2,9 mm pro Jahr, korrigiert um den Einfluss von Landsenkungen liegt dieser Wert bei nur +1,1 mm bis +1,9 mm pro Jahr (HEIN et al. 2014). Der Tidehochwasserstand stieg an den Pegeln der Ästuar von Ems, Weser und Elbe um ca. +23 cm bis +33 cm pro 100 Jahre. Gleichzeitig hat sich das Tideniedrigwasser um +26 cm bis -19 cm verändert.

Eine Beschleunigung des Anstiegs des mittleren Tidemittelwassers konnte anhand von Pegelmessdaten nicht festgestellt werden. Eine Projektion besagt, dass sich dies ändern könnte. Aussagen hierzu sind jedoch noch sehr unsicher, da u. a. nur eine Modellkette vorliegt und die Eisverluste von Grönland und der Antarktis noch nicht verlässlich abgeschätzt werden können.

Im Fall eines Anstiegs des Meeresspiegels sollte man auch einen positiven Effekt durch den Klimawandel nicht unterschlagen: Für die Schifffahrt entsteht zusätzliche Wassertiefe. Daneben ist jedoch zu erwarten, dass sich der stromaufwärts gerichtete Transport von Sedimenten und Schwebstoffen in die Ästuar verstärken wird (sog. „Tidal Pumping“)(WINTERSCHIED et al. 2014). Häufigere Hochwasserereignisse im Binnenland können steigende Schwebstoff- und Schadstoffeinträge in die Ästuar von Elbe, Weser und Ems sowie in die Nordsee bewirken. Damit sind erhöhte Schadstoffgehalte im Baggertgut, vor allem an der Elbe,

Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

möglich. Gleichzeitig verstärken lang anhaltend niedrige Oberwasserzuflüsse und ein Meeresspiegelanstieg in der Tideelbe die Ablagerung von marinen Sedimenten. Diese "Verdünnung" sorgt in den zu baggernden Sedimenten eher für eine gegenläufige, geringere Belastung (KLEISINGER et al. 2014).

künstliche Sandinsel könnten den Effekt des Meeresspiegelanstiegs auf Sturmflutschichtwasserstände reduzieren (Abbildung 6). Die Untersuchungen haben ergeben, dass ein Damm den Effekt des Meeresspiegelanstiegs auf Sturmflutschichtwasserstände um 20 cm reduzieren kann, die Sandinsel

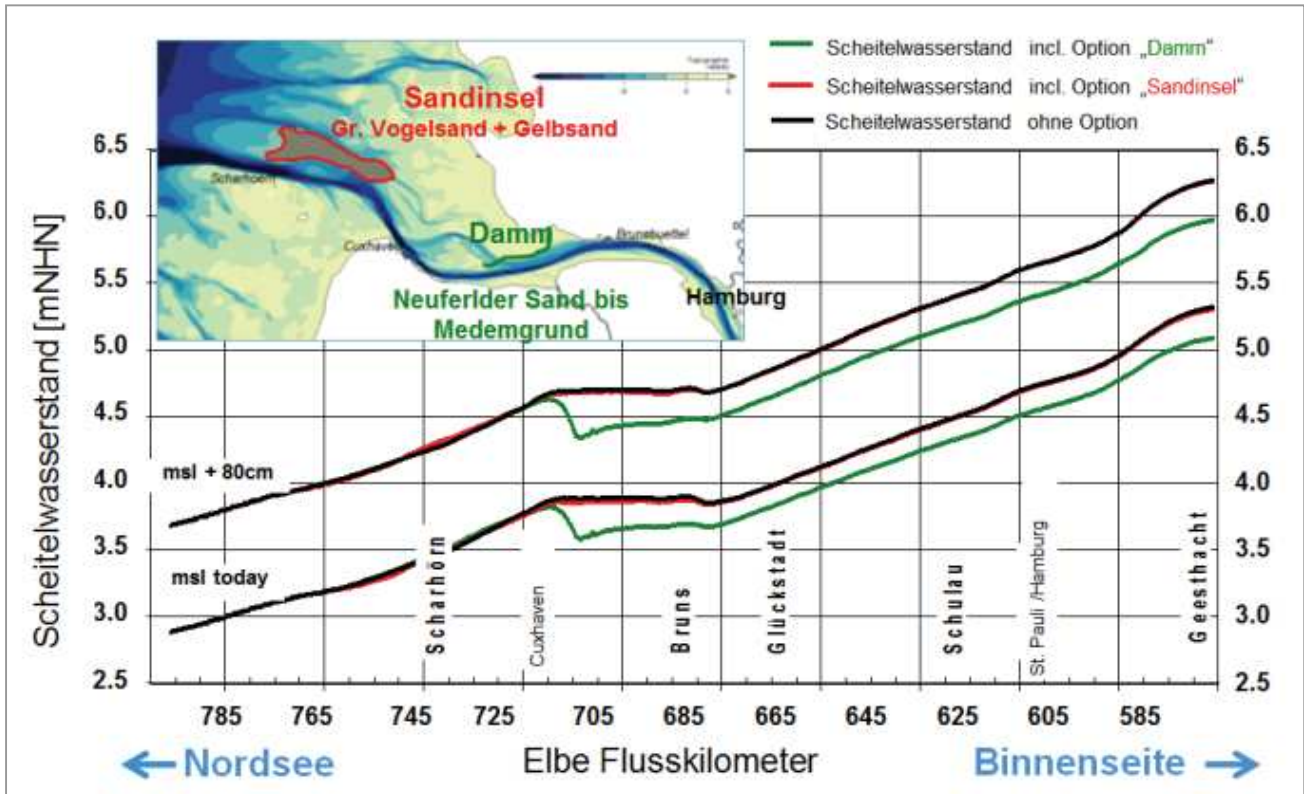


Abbildung 6: Effekte auf Sturmflutschichtwasserstände durch die Optionen „Damm“ und „Sandinsel“ im Mündungsbereich des Elbe-Ästuars. Vergleich für den Referenzzustand „heute“ und für ein Szenario mit + 80 cm mittlerem Meeresspiegelanstieg (SEIFFERT et al. 2014)

Die projizierte Veränderung der Oberwasserzuflüsse in die Tideelbe beeinflusst die Wanderrichtung und -geschwindigkeit von Unterwasserdünen, nicht jedoch deren Höhe. Folglich bleiben die Baggermengen aus der Unterhaltung dieser sandigen Einzeluntiefen konstant.

Die Maßnahmen zur Minderung der Schadstoffbelastung im Binnenbereich zeigen schnellere und stärkere Auswirkungen in den Ästuaren als klimabedingte Änderungen. Das gleiche gilt für Maßnahmen des Sedimentmanagements im Ästuar: Ihr Einfluss auf den Sedimenthaushalt und die Sedimentqualität übertrifft wahrscheinlich die klimabedingten Auswirkungen. Aus Sicht der Gewässerchemie kann geschlossen werden, dass bezogen auf die untersuchten Parameter (Ionenstärke, pH, Wassertemperatur) und im Hinblick auf Wasserbaumaterialien keine Anpassung der Unterhaltungskonzepte notwendig erscheint (SCHMUKAT et al. 2014).

Das Portfolio der Anpassungsoptionen umfasst außerdem wasserbauliche Maßnahmen, einige wurden detailliert an ausgewählten konkreten Beispielen untersucht. Sturmflutsperrwerke in den Ästuaren schützen das Hinterland effektiv. Auf der Seeseite des Sturmflutsperrwerks können jedoch erhöhte Wasserstände auftreten. Einengende Maßnahmen im Mündungsbereich von Ästuaren, wie ein Damm oder eine

jedoch keinen Effekt zeigt (SEIFFERT et al. 2014).

Eine auch unter den Gesichtspunkten des Naturschutzes wichtige Maßnahme ist der Erhalt der natürlichen Wattflächen sowie die Schaffung oder der Erhalt von Sedimentationsräumen. Generell ist ein kontinuierliches Monitoring dieser Flächen als Teil des Sedimentmanagements weiter zu entwickeln und die veränderten Wasserstände für das Be- und Entwässerungsmanagement der unmittelbar anschließenden küstennahen Einzugsgebiete zu prüfen.

3.2 Ausgewählte Ergebnisse für die Binnenwasserstraßen

Die aus den Ensembles resultierenden Szenarienkorridore der Abflussprojektionen für die Binnenwasserstraßen zeigen für die nahe Zukunft bis 2050 moderate Veränderungen an, allerdings ohne eindeutige Richtung. Für die ferne Zukunft wird jedoch bei Niedrigwasserabflüssen im Sommerhalbjahr eine deutlichere Tendenz zur Abnahme projiziert (Abbildung 7).

Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

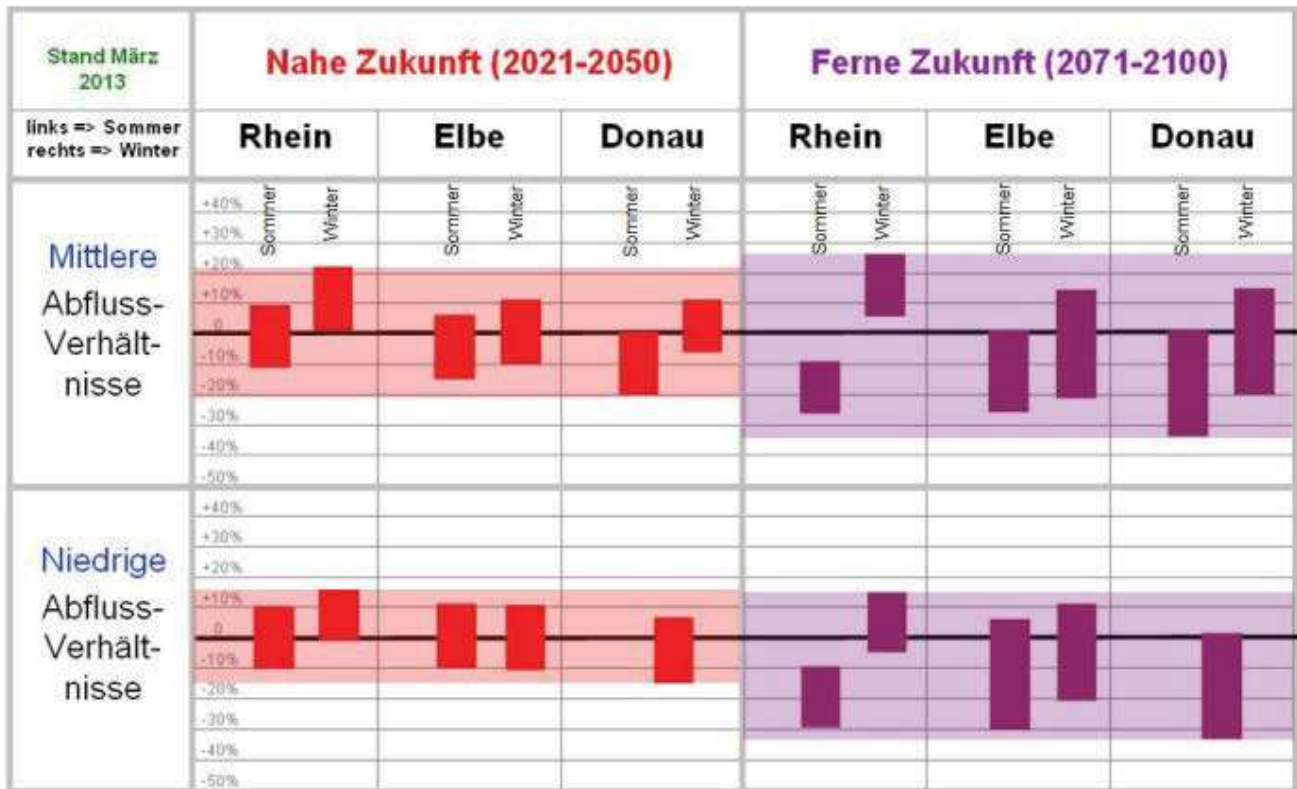


Abbildung 7: Klimabedingte Änderungen der Abflüsse im Hauptstrom von Rhein, Elbe und Donau im Vergleich zur Referenzperiode 1961 – 1990 (Balken: aus Ensemble resultierender Szenarienkorridor, siehe Abb. 2 und 3 (Maurer 2013))

Nutzungen/Funktionen mit Abhängigkeit von der/vom	Kennwert	Handlungsbedarf mit Blick auf		Bewertung der Information	
		Gebiet	Zeitraum	Signalstärke	Vertrauen
Wasserdargebot (z. B. Wassergewinnung)	MQ (Mittlerer Abfluss), hydrologisches Jahr (Nov.-Okt.)	Rhein	-	0	+
		Elbe	ab 2050	++	+
		Donau	ab 2050	++	+
Sommerabfluss (z. B. Wasserbewirtschaftung)	MQ (Mittlerer Abfluss), hydrologischer Sommer (Mai-Okt.)	Rhein ^o	ab 2050	++	++
		Elbe	sofort	+	++
		Donau ^o	sofort	+	++
Mindestwassermenge (z. B. Durchgängigkeit, Schifffahrt)	NM7Q (Niedrigster über 7-Tage gemittelter Abfluss) bzw. NMoMQ (niedrigster mittlerer monatlicher Abfluss), Wasserhaushaltsjahr (Apr.-Mrz.)	Rhein ^o	ab 2050	+	++
		Elbe	ab 2050	++	+
		Donau ^o	sofort	+	++
Hochwasser (Hochwasserschutz, Sedimentmanagement, Schifffahrt)	HM5Q (Höchster über 5-Tage gemittelter Abfluss) bzw. HMoMQ (höchster mittlerer monatlicher Abfluss), hydrologisches Jahr (Mai-Apr.)	Rhein ^o	sofort	+	0
		Elbe	sofort ^{a)}	++	+
		Donau	-	0	+

a) Abgeleitet aus Bezugsperiode 2001-2030

Tabelle 2: Handlungsbedarf in ausgewählten durch Klimawandel betroffenen Nutzungen/Funktionen im Bereich Wasserwirtschaft (NILSON et al. 2014) Zur Symbolik s. Tabelle 3.

Tabelle 2 gibt wieder, in welchen Flussabschnitten und in welchem Zeitraum sich aus hydrologischer Sicht ein Handlungsbedarf ableitet. Darüber hinaus zeigt sie, wie

die Ergebnisse für Entscheider aufbereitet werden. Tabelle 3 erläutert die Symbole.

Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

Kriterium	Symbol/Klasse	Bedingung/Bedeutung
Signalstärke ^{b)}	++	Szenarienkorridor weist Richtung auf und Änderung > 15% (relevanter Randwert)
	+	Szenarienkorridor weist Richtung auf und Änderung ≤ 15% (relevanter Randwert)
	0	Szenarienkorridor weist keine Richtung auf
Vertrauen	++	Spanne der Szenarienkorridore meist ≤ 20% bezogen auf das Änderungssignal
	+	Spanne der Szenarienkorridore meist > 20 - 30% bezogen auf das Änderungssignal
	0	Spanne der Szenarienkorridore meist > 30% methodische Vorbehalte
Gebiet ^{Abflussregime}	Rhein [°] /*, Elbe [°] /*, Donau [°] /*	° = Regen- und komplexe Abflussregime * = Schneeregime ohne Superskript = gesamtes Einzugsgebiet
Zeitraum	-	Derzeit kein Handlungsbedarf absehbar; Entwicklung jedoch beobachten.
	sofort	Unmittelbarer Handlungsbedarf
	ab 2050	Handlungsbedarf absehbar, wenn Emissionen weiter gemäß SRES A1B ansteigen.

b) Bei indifferenten Änderungssignalen (z.B. +/-10%) wird hier kein akuter Handlungsbedarf abgeleitet. Bei hochsensitiven und bereits heute verwundbaren Systemen kann jedoch auch schon eine Änderung von 10% relevant sein.

Tabelle 3: Erläuterung der Symbole in Tabelle 2 (NILSON et al. 2014)

Potenziell geringerer Handlungsbedarf, der sich aus den teilweise auch projizierten, positiven Entwicklungen z. B. durch höhere Niedrigwasserabflüsse ableitet, wurde nicht weiter betrachtet. Bestimmend für die Ableitung eines Handlungsbedarfs ist ein deutliches und robustes Änderungssignal in einem der beiden Zukunftszeiträume, d. h. mindestens die Signatur "+" für die Kriterien "Signalstärke" und "Vertrauen" (vgl. Tabelle 3.). Die "Signalstärke" bezieht sich auf den für die jeweilige Nutzung oder Funktion relevanten Randwert des Szenarienkorridors, d. h. den unteren Rand bei Sensitivität gegenüber niedrigen Abflüssen bzw. den oberen Rand bei Sensitivität gegenüber hohen Abflüssen. Handlungsbedarf wird somit gemäß einer Betroffenheit und "auf der sicheren Seite" abgeleitet.

Hinsichtlich einer Verminderung des jährlichen Wasserdargebotes lassen die Auswertungen für die nächsten Jahrzehnte in keinem untersuchten Einzugsgebiet einen unmittelbaren Handlungsbedarf erkennen. Diese Thematik ist jedoch weiter zu beobachten und kann bei fortschreitender klimawandelbedingter Veränderung des Wasserhaushalts (gemäß SRES A1B) in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts vor allem für Elbe und Donau relevant werden. Für das Rheingebiet und die gegenwärtig schneedominierten Abflussregime der Donau zeichnet sich in dieser Hinsicht Handlungsbedarf in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts ab. Für Nutzungen oder Funktionen, die gegenüber Niedrigwassersituationen sensitiv sind, ist angesichts der vorgestellten Ergebnisse lediglich im Donaueinzugsgebiet zeitnaher Handlungsbedarf angezeigt. An Rhein (unterhalb Maxau, Rhein-km 362) und Elbe ist im weiteren Verlauf des Jahrhunderts (nach 2050) bei fortschreitendem Klimawandel Handlungsbedarf zu erwarten.

Die Betroffenheit der Binnenschifffahrt und der verladenden Wirtschaft am Rhein durch Niedrigwassersituationen liegt in den nächsten Jahrzehnten nahe an den heutigen Verhältnissen und nimmt erst gegen Ende des 21. Jahrhunderts zu. Für die ferne Zukunft errechnet sich, wenn man die heutigen Kostenstrukturen und Mengen des Rheintransportes zugrunde legt, eine Steigerung der jährlichen Gesamttransportkosten für die Binnenschifffahrt zwischen 5 % und 9 % im Vergleich zur Gegenwart. Die untersuchten Anpassungsmaßnahmen, z. B. die Optimierung der Schiffstechnik und des Schiffsbetriebs, könnten diese Kostensteigerung teilweise auffangen und um ca. die Hälfte reduzieren (Abbildung 8).

Für andere sensitive Kennwerte wie die Schwebstofffrachten ergeben die Projektionen keine eindeutige großräumige Tendenz. Die Änderungssignale liegen in derselben Größenordnung wie anthropogene Einflüsse, z. B. durch Querverbauung und Landnutzungsänderungen im Einzugsgebiet. Regionale Betrachtungen sind von Fall zu Fall notwendig.

Für den Gesamtrhein zeigt die Sohlentwicklung für eine Abflussprojektion und bei konstanten Baggerungen und Zugaben auf heutigem Niveau für die nahe Zukunft (2021 - 2050) wenig ausgeprägte Änderungssignale. Gemäß der hydrologischen Projektion für die ferne Zukunft (2071 - 2100) ergibt sich eine Tendenz zu verstärkter Erosion (siehe Abbildung 9). Für die nahe Zukunft, sind lokal zwar gravierende morphologische Änderungen möglich, jedoch ist im Mittel die Summe aus Erosion und Sedimentation gleich bleibend. Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Wahl der Unterhaltungsstrategie, zumindest für die nahe Zukunft, einen weitaus größeren Einfluss auf die Sohlagenentwicklung und den Sedimenthaushalt besitzt, als die Änderung aus einer klimabedingt veränderten Abflusscharakteristik des Flusseinzugsgebietes.

Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

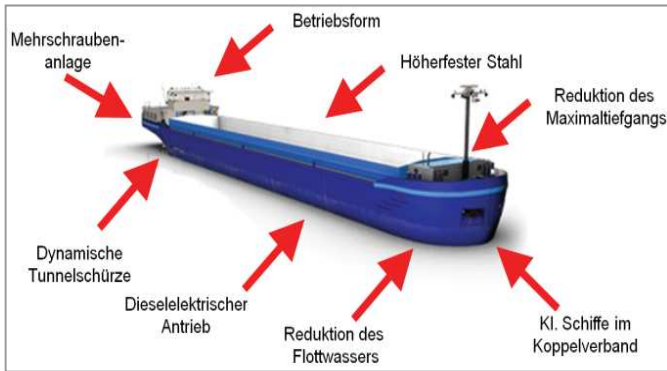


Abbildung 8: Untersuchte Anpassungsoptionen in Schiffstechnik und Schiffsbetrieb (MAURER & NILSON 2013)

An der Elbe hingegen liegen andere morphologische Bedingungen vor. Das klimawandelbedingte Änderungssignal der Flussbettentwicklung für die nahe Zukunft liegt dort in der Größenordnung der derzeitigen Unterhaltungsmengen. Dies würde deutliche Zusatzaufwendungen bedeuten.

Zahlreiche Wärmeeinleitungen überprägen den Temperaturhaushalt des Rheins. Die Simulationläufe zeigen, dass die Wassertemperaturen des Rheins in der nahen Zukunft klimabedingt zusätzlich in ähnlichem Maße erhöht werden, wie dies durch genehmigte Einleitungen bereits heute geschieht. Das bedeutet, dass der Effekt des Klimawandels durch reduzierte Wärmeeinleitungen zumindest zeitweise gedämpft werden kann. In der fernen Zukunft wirkt sich die klimabedingte Temperaturerhöhung stärker aus. Am deutlichsten steigt die Wassertemperatur im August (2,6 – 3,4 °C; siehe Abbildung 10). Trotz der Erhöhung der Wassertemperaturen sind die Auswirkungen auf die Sauerstoffkonzentrationen im Rhein gering. Sie werden durch die geringere physikalische Löslichkeit des Sauerstoffs bei höheren Wassertemperaturen leicht reduziert. Ebenfalls gering sind die Auswirkungen veränderter Abflüsse und Wassertemperaturen auf die Algenentwicklung. Sie liegen im Bereich der Mess- und Modellunsicherheiten.

Für den Rhein und die Flusshavel ist zu empfehlen, die erlaubten Wärmeeinleitungen und die Schwellenwerte bei Genehmigungen als Anpassungsmaßnahmen zu überprüfen. Insgesamt ist auf die deutliche Überlagerung von Klimaeffekten durch Bewirtschaftung des Wärmehaushaltes hinzuweisen.

Schifffahrtsbehindernde Vereisungen der Wasserstraßen werden in der nahen Zukunft, spätestens jedoch in der fernen Zukunft zunehmend die Ausnahme als die Regel sein. Somit gilt es zu bewerten, wie Eisvorhersage- bzw. Frühwarnsysteme (weiter-)entwickelt werden müssen.

Das Portfolio der Anpassungsoptionen beinhaltet auch wasserbauliche Lösungen, wie die Optimierung der Fahrinnenbreite des frei fließenden Rheinabschnitts zwischen Mainz und St. Goar (Rhein-km 493 - 557). Diese Strecke beinhaltet unter heutigen Abflussbedingungen maßgebliche Engpässe und stellt navigations-technisch besonders hohe Anforderungen an die Schifffahrt und die Unterhaltung.

In den Untersuchungen erwiesen sich konventionelle (Längswerke, Buhnen etc.) und temporär wirksame Regelungsmaßnahmen (Schlauchwehre, -buhnen etc.) sowie die Unterhaltung einer abgestuften Fahrrinne, bei der die heutige Fahrinnentiefe nur noch auf einer geringeren Breite erhalten wird, als zielführend. Erhöhte Anlandungs- oder Erosionstendenzen können durch die ortsspezifischen Baggerungen kompensiert werden.

Die Abbildung 11 zeigt am Beispiel der genannten Mittelrheinstrecke die Auswirkung einer solchen abgestuften Fahrrinne und zusätzlich errichteter Längswerke auf die erforderlichen Baggervolumina. Ausgangsannahme für die ferne Zukunft ist ein um 25% gesunkener gleichwertiger Abfluss (GLQ). Bezogen auf das Gesamtbagervolumen im Referenzzeitraum ohne Maßnahmen steigen demnach die Baggervolumina durch diese Maßnahmen um 88% statt um 296% (SCHRÖDER & WURMS 2013). Diese Abschätzungen sind hilfreich für die Entwicklung eines angepassten dynamischen Sedimentmanagements. Insgesamt sehen wir ein hohes verkehrswasserbauliches Anpassungspotenzial an die Folgen des Klimawandels.

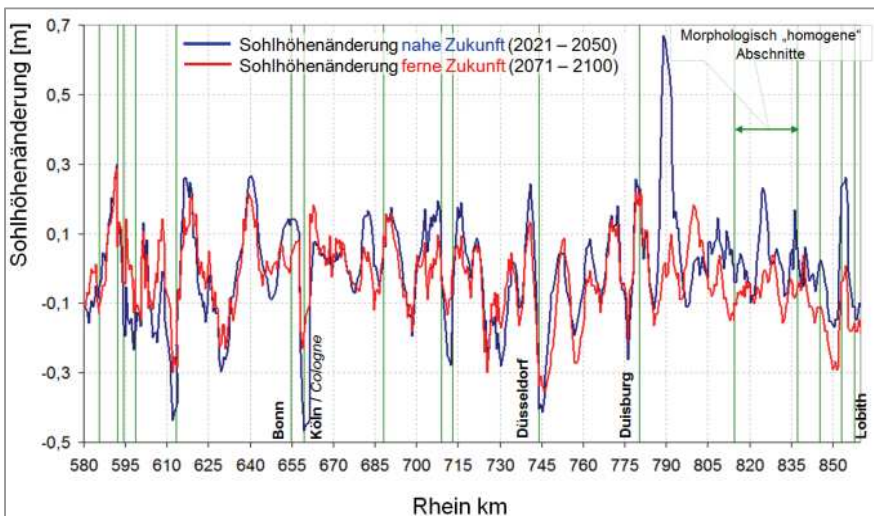


Abbildung 9: Relative Sohlentwicklung [m] in der nahen und fernen Zukunft für die Projektionen der Modellkette C20_A1B_EH5r3_Remo_25_Is_HBV134_SOBEK in Bezug zum Sohlzustand 2004 und zum Abfluss für den Referenzzeitraum 1961-1990; Niederrhein km 580 - 860 (ROBERTS & VOLLMER 2014).

4. Erste Überlegungen der Administration zum Anpassungsbedarf

Eine korrekte Interpretation der Ergebnisse der Projektionen setzt voraus, dass Modellunsicherheiten hinsichtlich Umfang und Quelle bekannt sind und dies auch kommuniziert wird. Die Auftraggeber und Entscheider im Management der Wasserstraßen haben erkannt, dass es nicht „das vertrauenswürdige Modell“ und einen Wert für eine Klimaauswirkung geben kann. Sie sehen den Nutzen und die Notwendigkeit, Bandbreiten und „Szenarienkorridore“ von Klimaprojektionen für ihre Entscheidungsfindung zugrunde zu legen (BMVBS 2013).

Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

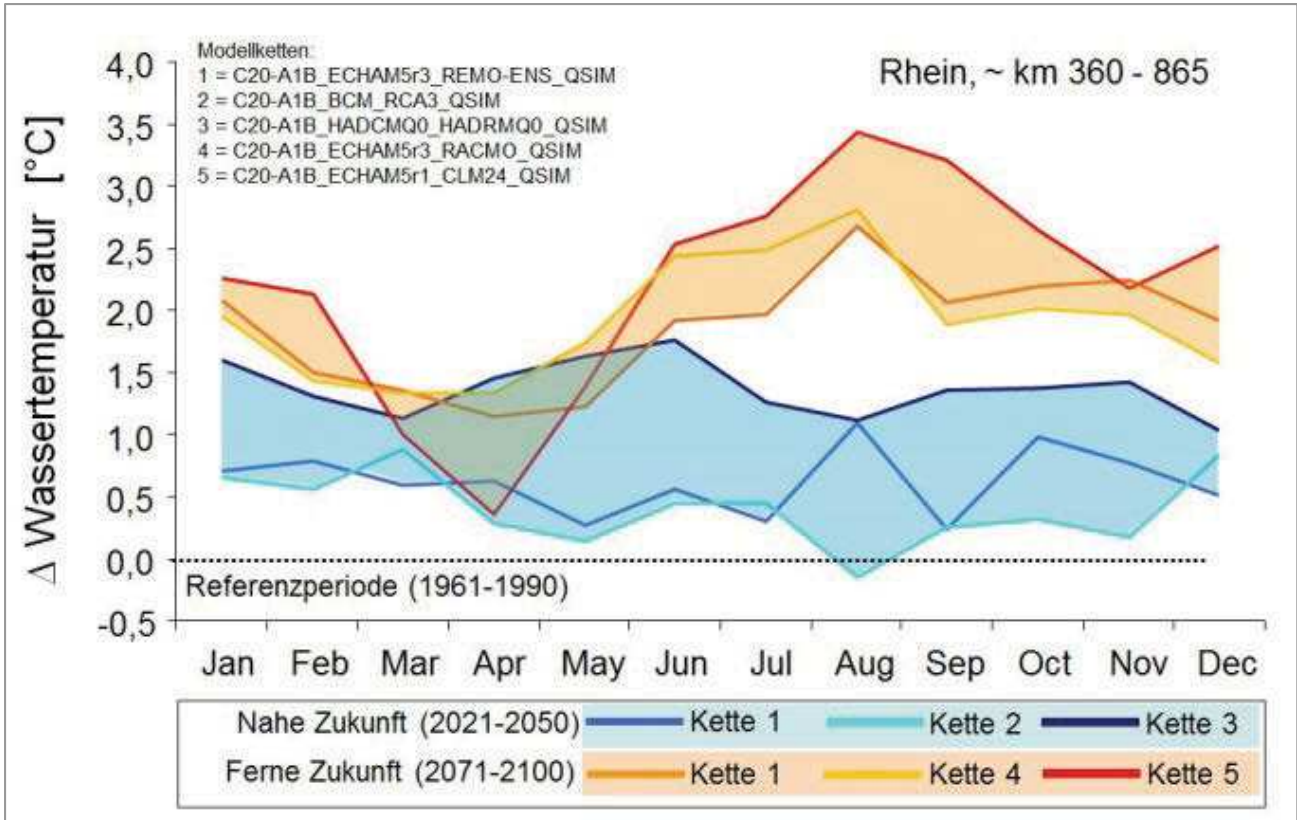


Abbildung 10: Projizierte Änderungen der Wassertemperatur (Monatsmittel) als Bandbreite der Modellketten verglichen mit der Referenzperiode (1961-1990). Mittelwerte von 9 Messstationen auf der frei fließenden Rheinstrecke zwischen Karlsruhe (km 360) und Bimmen (km 865). (HARDENBICKER et al. 2014)

Sie kommen zu dem Schluss, dass die vorliegenden projizierten Änderungen keine unmittelbaren Investitionsentscheidungen auslösen. Die von KLIWAS für die nahe Zukunft (bis 2050) projizierten klimabedingten Veränderungen befinden sich dem gemäß in einer Größenordnung, die grundsätzlich mit den vorhandenen Vorgehensweisen und Ressourcen bewältigt werden könnten. Das bedeutet, dass zumindest bis Mitte des Jahrhunderts die Schifffahrt in Deutschland auch unter den Bedingungen des Klimawandels weiterhin die benötigten Transportleistungen erbringen kann.

Auf längere Sicht, ab Mitte bis Ende des Jahrhunderts, sehen die Entscheider weitergehenden Anpassungsbedarf. Angesichts lang andauernder Planungs- und Umsetzungsprozesse will man mit den neuen Erkenntnissen bereits jetzt beginnen, Vorschläge für ökologisch und ökonomisch geeignete Anpassungsmaßnahmen zu erarbeiten. Dabei bevorzugt das BMVI sogenannte Maßnahmen ohne Reue (no regret), die auch ohne das Eintreten von Klimafolgen einen Fortschritt zur Gewährleistung der verkehrlichen Zuverlässigkeit erbringen.

Konkret bedeutet das für den Rhein z. B. im Verbund mit den zuständigen Ländern und Anliegerstaaten konsequent Maßnahmen zur Erkundung, Sicherung und Beseitigung von schadstoffbelasteten Sedimenten im Gewässerbett zu ergreifen, um Umweltqualitätsziele der EU- Wasserrahmenrichtlinie und Ziele der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) für den stromabliegenden freifließenden Flussbereich zu erreichen.

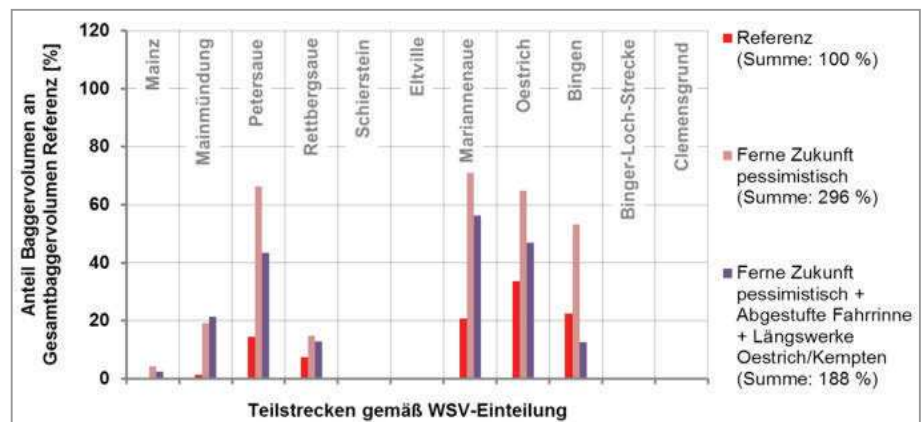


Abbildung 11: Reduzierung des klimabedingten Anstiegs des Wartungsaufwandes der Fahrinnen durch eine „abgestufte Fahrinne“ in Ergänzung zu Längsbauwerken in einem Teilabschnitt der Rhein-Untersuchungsstrecke (SCHRÖDER & WURMS 2013)

Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

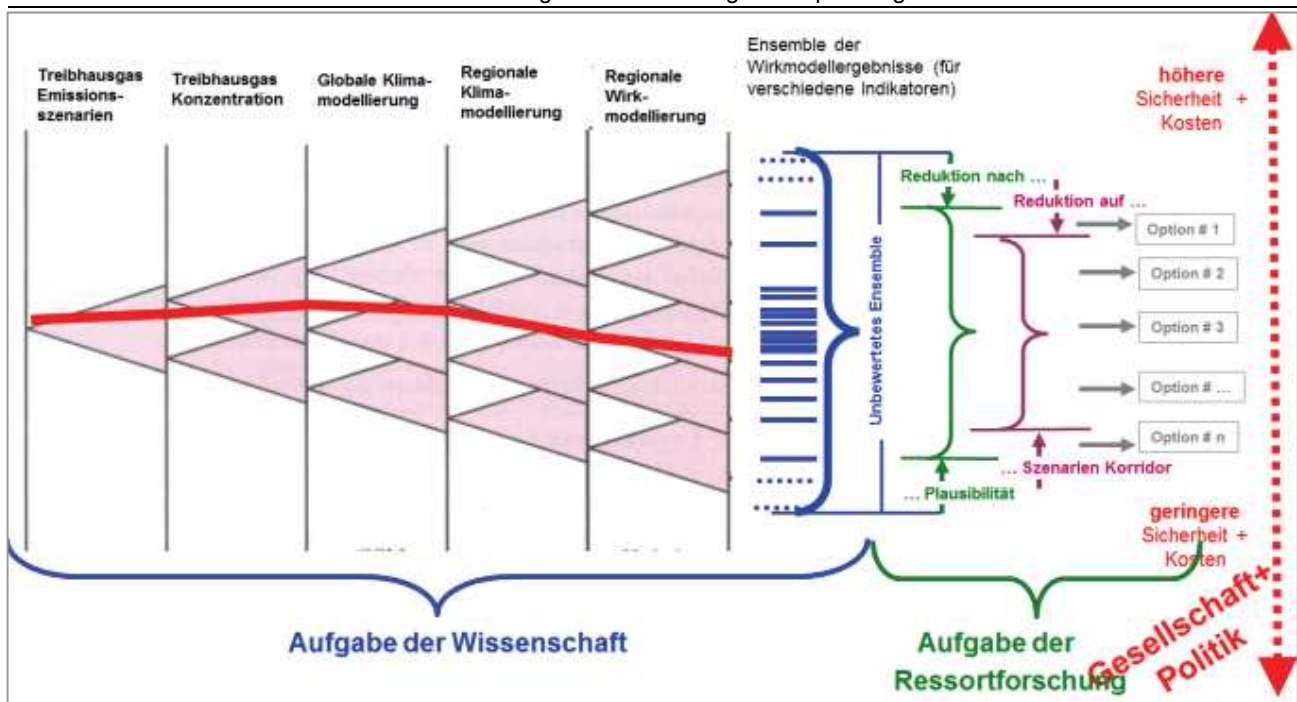


Abbildung 12: Ensemble der Projektionen und Schritte zur Entscheidung über Anpassungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der Unsicherheit (MAURER & NILSON 2013)

Im Binnenbereich will man die zu erwartenden fortschreitende Erwärmung der Wassertemperatur an Binnenwasserstraßen und die damit verbundenen ökologischen Auswirkungen berücksichtigen. Dabei spielen Szenarien zum Abschalten der Kernkraftwerke (Energiewende) und der damit verbundenen Reduzierung der Einleitung von Kühlwasser eine Rolle, die eine Wärmeentlastung für die Wasserstraßen mit sich bringen kann. Die erwartete globale Erderwärmung könnte teilweise kompensiert werden. Das BMVI will diese Entwicklung hinsichtlich seiner Verantwortlichkeiten für Betrieb und Unterhalt der Binnenwasserstraßen aufmerksam über bestehende Messprogramme verfolgen.

Die Auswertung der bislang angewendeten Modellkonfigurationen für das CO₂-Emissionszenario A1B zeigt bislang keine markanten Herausforderungen oder Einschränkungen für die Schifffahrt oder die Wasserstraßeninfrastruktur im Küstenbereich an. Hier fordert man dennoch weitere Forschungen, um mehr Klarheit über das Erfordernis zur vorsorglichen Änderung von Bemessungsvorgaben für Infrastruktur und Betrieb zu erhalten.

Schließlich will man das von KLIWAS komplementär zu den Projektionen der Modellkette angewendete Konzept der Sensitivitätsstudien anwenden lassen, um detaillierte Informationen zur Betroffenheit von wasserbaulichen Anlagen zu erhalten. Trotz noch großer Unsicherheiten und Bandbreiten in den Klimaprojektionen an der Küste ist es damit in Zusammenarbeit mit der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung möglich, Anpassungsoptionen fundiert weiter zu entwickeln.

5. Allgemeine Ergebnisse für den Entscheidungsprozess zur Anpassung

Die im Forschungsprogramm erzielten Erkenntnisse konnten nur erlangt werden durch die Vernetzung der

BMVI-Ressortforschungseinrichtungen, die vorwiegend auf einen Praxisbezug achten müssen, mit anderen Forschungseinrichtungen, die sich mehr mit grundlegenden methodischen Aspekten auseinandersetzen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Simulationsmodelle sich als prognostische Instrumente eignen, künftige Klimaauswirkungen abzuschätzen (MOSER et al. 2012). Sie helfen Entscheidungen zu Langfrist-Investitionen in die Infrastruktur zu treffen. Da es kein „bestes“ Modell gibt und geben wird, sind Multi-Modell-Ensembles Stand der Technik und bei Abschätzungen klimabedingter Änderungen zu empfehlen. Diese Bandbreite wird zwar oft als Unsicherheit der Klimafolgenforschung wahrgenommen, der Ansatz bringt aber im Sinne einer „Marktübersicht“ eine größere Sicherheit für Entscheider mit sich und sorgt für Transparenz. Dies war eine Herausforderung für die Kommunikation von Ergebnissen, zu der KLIWAS einen Beitrag geleistet hat.

Die Ergebnisse des Forschungsprogramms KLIWAS wurden mit den Entscheidungsträgern diskutiert, die nun anhand der Bandbreite der Projektionen und der Szenarien abwägen müssen zwischen dem gesamtwirtschaftlichen Nutzen und den Kosten für die Anpassung (Abbildung 12). Denn der Klimawandel ist nur eine Entscheidungsgröße neben verschiedenen anderen, die in den Planungs- und Entscheidungsprozessen für den Verkehrsträger Schiff/Wasserstraße eine Rolle spielen.

In der Folge wird dies zu einer Abschätzung der Vulnerabilität der Schifffahrt gegenüber dem Klimawandel und zu einer Auswahl an Anpassungsmaßnahmen zur Vorbereitung an zukünftige Bedingungen führen.

Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

6. Ausblick: Klima-Service für Wasserstraßenbetreiber und politische Entwicklung

Das Konzept, disziplinäre Modelle in einer Kette zu kombinieren, um komplexe, in einem Ursache-Wirkungszusammenhang stehende Sachverhalte zu untersuchen, ist nicht neu. Dies trifft auch auf den Multi-Modell Ansatz zu. Die in KLIWAS durchgeführte Vorgehensweise bedeutet lediglich die konsequente Umsetzung dieser Konzepte für die Klimafolgenforschung bezogen auf Wasserstraßen.

Die sich nun ergebende Herausforderung ist vielmehr die Etablierung eines „climate service“ für die routinemäßig und geregelt ablaufenden Planungsschritte für langfristige Investitionen in die Infrastruktur der Wasserstraßen (MOSER et al. 2012). Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), der Deutsche Wetterdienst (DWD), das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und ihr wissenschaftliches Netzwerk werden ihr nun erprobtes Modellinstrumentarium für künftige Generationen von Klimamodellen und –szenarien bereithalten und anwenden. Ein wichtiger Meilenstein hierzu ist bereits der 5. Assessment Report des Weltklimarates (IPCC). Sobald sich neue Erkenntnisse zu globalen Emissionsszenarien und Klimaprojektionen ergeben, sind diese auf die regionalen Verhältnisse in Deutschland und die Auswirkungen auf die Bedingungen an den Wasserstraßen zu übertragen. Wissenschaftlich fundierte Ergebnisse über mögliche Klimafolgen (Blick in die Zukunft anhand von Prognosen und Projektionen) werden ein fester Bestandteil der Planung und Entscheidungen für Investitionen und Unterhaltungsmaßnahmen an den Bundeswasserstraßen sein. Die dazu erforderlichen Instrumente werden weiter entwickelt und relevantes neues Wissen (z. B. IPCC AR 5) sukzessive berücksichtigt

Literatur

<http://www.kliwas.de>

http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/02_Aktuelles/12_statuskonf_2013/statuskonf_2013_node.html

BFG BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE, DWD DEUTSCHER WETTERDIENST, BSH BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE, BAW BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (Hrsg.) (2013): KLIWAS kompakt. Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt - Entwicklung von Anpassungsoptionen. Ausgewählte, vorläufige Ergebnisse zur 3. Statuskonferenz am 12./13.11.2013. KLIWAS-22/2013, 120 S.

BMVBS BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (2013): Die Zukunft von Wasserstraßen und Schifffahrt gestalten in Zeiten des Klimawandels. Wie passen wir uns an? Fachliche Schlussfolgerungen des BMVBS aus den vorläufigen Ergebnissen des Forschungsprogramms KLIWAS für die 3. KLIWAS-Statuskonferenz 12./13.11.2013, Berlin, 15 S.

BÜLOW, K., GANSKE, A., HÜTTL-KABUS, S., KLEIN, B., KLEIN, H., LÖWE, P., MÖLLER, J., SCHADE, N., TINZ, B., HEINRICH, H., ROSENHAGEN, G. (2014): Ozeanische und

atmosphärische Referenzdaten und Hindcast-Analysen für den Nordseeraum. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 1.03. KLIWAS-30/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_30/2014_1.03

HARDENBICKER, P., BECKER, A., FISCHER, H. (2014): Klimabedingte Änderung des Stoffhaushalts und der Algenentwicklung in Bundeswasserstraßen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.02. KLIWAS-49/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_49/2014_5.02

HEIN, H, MAI, S., BARJENBRUCH, U. (2014): Klimabedingt veränderte Tidekennwerte und Seegangstatistik in den Küstengewässern. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.03. KLIWAS-33/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_33/2014_2.03

HILLEBRAND, G., POHLERT, T., BREITUNG, V. (2014): Klimaprojektionen für den Sedimenthaushalt und Risiken durch kohäsive Sedimente. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.01. KLIWAS-48/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_48/2014_5.01

KLEISINGER, C., BURGER, B., GROPE, N., SCHUBERT, B. (2014): Klimabedingt verändertes Transportverhalten schadstoffbelasteter Sedimente und Unterhaltung von Wasserstraßen in Nordsee-Ästuaren. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.06. KLIWAS-40/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_40/2014_3.06

KOFALK, S., MOSER, H, RUDOLF, B., HEINRICH, H., HEYER, H. (2010): Den Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt begegnen: Das deutsche Forschungsprogramm KLIWAS. In: PIANC Deutschland (Hrsg.): Deutsche Kongressberichte, 32. PIANC Kongress, 11.-15.05.2010 Liverpool, Großbritannien, S. 1-6. http://pianc.vzb.baw.de/publikationen/deutsche_kongressberichte/pdfs/2010-01.pdf

MAURER, T. (2013): Research task 4, contributions to transport infrastructure analyses. Internal presentation and reporting, BMVBS 12.03.2013, Bonn

MAURER, T., NILSON, E. (2013): Mögliche Anpassungsmaßnahmen für Binnenwasserstraßen und Schiffsflotte. 3rd KLIWAS-Statuskonferenz, 12. – 13. November 2013, Presentation http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/02_Aktuelles/12_statuskonf_2013/03_programm/mi_1105.pdf?blob=publicationFile

MOSER, H., CULLMANN, J., KOFALK, S., MAI, S., NILSON, E., RÖSNER, S., BECKER, P., GRATZKI, A., SCHREIBER, K.-J. (2012): An integrated climate service for the transboundary river basin and coastal management of Germany. In: World Meteorological Organisation (2012) Climate ExChange, p. 88-91. Tudor Rose. <http://www.wmo.int/pages/gfcs/tudor-rose/index.html#88/>

NILSON, E., KRAHE, P., LINGEMANN, I., HORSTEN, T., KLEIN, B., CARAMBIA, M., LARINA, M. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01. KLIWAS-43/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_43/2014_4.01

PLAGEMANN, S., IMBERY, F., NAMYSLO, J. (2014): VALIDIERUNG UND BEWERTUNG VON KLIMAPROJEKTIONEN – BEREITSTELLUNG VON KLIMASZENARIEN FÜR DEN BINNENBEREICH. SCHLUSSBERICHT KLIWAS-PROJEKT 1.02.

Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

KLIWAS-29/2014.

DOI: 10.5675/Kliwas_29/2014_1.02

ROBERTS, M., VOLLMER, S. (2014): Klimaprojektionen für Sedimenthaushalt und Flussbettentwicklung. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.02. KLIWAS-44/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_44/2014_4.02

SCHMUKAT, A., DÜSTER, L., TERNES, T. A., HEININGER, P. (2014): Klimabedingte Änderungen der Lebensdauer und des Umweltverhaltens von Wasserbaumaterialien in Seeschiffahrtsstraßen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.05. KLIWAS-39/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_39/2014_3.05

SCHRÖDER, M., WURMS, S. (2014): Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.03. KLIWAS-45/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_45/2014_4.03

SEIFFERT, R., HESSER, F., BÜSCHER, A., FRICKE, B., HOLZWARTH, I., RUDOLPH, E., SEHIL, A., SEIB, G., WINKEL, N. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Küste und die Ästuare. Mögliche Betroffenheiten der Seeschiffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02. KLIWAS-36/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_36/2014_3.02

WINTERSCHIED, A., GEHRES, N., CRON, N. (2014): Einfluss von klimabedingten Änderungen auf den Sedimenthaushalt der Nordsee-Ästuare. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.03. KLIWAS-37/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_37/2014_3.03

Verfasser

Dr. Sebastian Kofalk

Bundesanstalt für Gewässerkunde
KLIWAS Koordination
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/1306-5330
E-Mail: kofalk@bafg.de

Dipl.-Ing. Stefanie Wienhaus

Bundesanstalt für Gewässerkunde
KLIWAS Koordination
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/1306-5215
E-Mail: wienhaus@bafg.de

Prof. Dr. Hans Moser

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Leiter Abteilung Quantitative Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/1306-5303
E-Mail: moser@bafg.de

Dr. Annegret Gratzki

Deutscher Wetterdienst
Leiterin Abteilung Hydrometeorologie
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach
Tel.: 069/8062-2989
E-Mail: annegret.gratzki@dwd.de

Dr. Hartmut Heinrich

Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrographie
Leiter Sachgebiet „Physik der Meere“
Bernhard-Nocht-Straße 78
20359 Hamburg
Tel.: 040/3190-3200
E-Mail: hartmut.heinrich@bsh.de

Dr.-Ing. Harro Heyer

Bundesanstalt für Wasserbau
Leiter der Dienststelle Hamburg
Wedeler Landstraße 157
22559 Hamburg
Tel.: 040/81908-300
E-Mail: harro.heyer@baw.de

Anpassung an den Klimawandel im Panamakanal

Prof. Dr. Michele Acciario

Kühne Logistics University, Hamburg

Zusammenfassung

Für die globalen Lieferketten ist der Panamakanal von hoher Relevanz, und seine Bedeutung für die globalen Transportnetze wird infolge des über 5 Mrd. US-Dollar teuren Kanalerweiterungsprogramms noch einmal zunehmen. Der Kanal ist die Haupteinnahmequelle der Volkswirtschaft Panamas. Auch ist er für etliche Häfen in den USA und für die Logistikstrategie vieler Frachtunternehmen weltweit signifikant wichtig. Seine Relevanz hängt dabei nicht nur von der Kanal-Infrastruktur und der Effizienz des Kanalbetriebs ab, sondern beruht auch auf der Zuverlässigkeit der Durchfahrt für internationale Seeschiffe, die der Kanal bietet. Für den Panamakanal ist ein solides Risikomanagement daher unerlässlich, damit gewährleistet ist, dass der Betrieb reibungslos und unabhängig von der Witterung, menschlichem Versagen oder sonstigen Störungen unterbrechungsfrei läuft.

Die Herausforderungen, die der Klimawandel für maritime Infrastrukturen mit sich bringt, treten immer deutlicher zutage: Der steigende Meeresspiegel bedroht Häfen in Inselform, und extreme Wetterereignisse treten immer häufiger auf. Auch für eine Infrastruktur wie den Panamakanal stellt der Klimawandel im Hinblick auf die Befahrbarkeit des Kanals, Pegelstände und das Erdbebenrisiko eine Bedrohung dar. Die Panama Canal Authority hat daher schon vor Jahren Anpassungsgrundsätze in ihren Risikomanagementplan aufgenommen. Es ist jedoch aufgrund der Unkalkulierbarkeit zukünftiger Klimaprognosen schwierig, die Plausibilität der Annahmen und die Risikoberechnungen in derartigen Plänen zu bewerten. Wissenschaftliche Literatur zur klimawandelrelevanten Bewertung der Risikolage für eine komplexe Infrastruktur dieser Art ist kaum vorhanden und speziell maritime Infrastrukturen sind ein kaum behandeltes Thema.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur Bewertung des Risikos für große Infrastrukturen wie den Panamakanal im Zusammenhang mit dem Klimawandel und legt dar, wie sich dieses Risiko durch geeignete Anpassungspläne abmildern lässt. Es werden verschiedene klimawandelbedingte Risiken für den Panamakanal erörtert und die wirtschaftlichen Verluste beziffert, die im unwahrscheinlichen Fall einer Schließung des Panamakanals eintreten würden. Die Kosten von Störungen des Kanalbetriebs werden aus einem lokalen, nationalen und internationalen Blickwinkel betrachtet. Vorläufige Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Klimawandel die Panamakanalzone potenziell vor große Herausforderungen stellt und somit für die Wirtschaft Panamas und die Effizienz globaler Lieferketten unter Umständen sehr folgenschwer sein könnte.

1. Einleitung

Die Republik Panama ist weit über ihre Grenzen hinaus für ihren Panamakanal bekannt. Durch den Kanal, und den Finanzsektor, kann das Land eine erstaunliche

Wirtschaftsleistung vorweisen (ECLAC, 2012). Die Bevölkerung von 3,5 Millionen lebt jedoch zum Teil weiterhin in Armut, insbesondere in ländlichen Gebieten: Über die Hälfte aller Bewohner im ländlichen Raum wurde 2004 als arm eingestuft und 22 % als extrem arm (Weltbank, 2011). Im letzten Jahrzehnt hat sich daran nichts Wesentliches geändert, und das Wirtschaftsgefälle zwischen den verstädterten und den ländlichen Gebieten des Staates hat sich trotz der enormen Ressourcen des Landes verschärft (Foster, *et al.* 2011).

Armut und soziale Ungleichheit belasten darüber hinaus die Umwelt und tragen zum Raubbau an den natürlichen Ressourcen des Landes bei. Das Problem wird zudem durch eine ungleiche Landverteilung und problematische Grundbesitzverhältnisse sowie den schwierigen Zugang zu Krediten für lokale landwirtschaftliche Erzeuger und eine mangelnde Wettbewerbsfähigkeit ihrer Erzeugnisse verschärft (Weltbank, 2007). Zwar ist Panama zu 40 % bewaldet und über 12 % der Landmasse des Staates steht unter Schutz, die Armut wirkt sich jedoch auf die natürliche Tier- und Pflanzenwelt und geschützte Areale aus und die Entwaldung schreitet ungehemmt voran.

Das tropische Klima und die Konzentration der Bevölkerung in einigen dicht besiedelten Regionen setzt die Bewohner dem Risiko von Epidemien und Naturkatastrophen wie Überschwemmungen, schweren Stürmen und Dürre aus, insbesondere in den ärmsten Regionen des Landes. Panama steht auf Platz 14 der Länder, die verschiedensten Gefahren in besonderem Maße ausgesetzt sind – dabei sind 15 % seiner Gesamtfläche und 12,5 % seiner Bevölkerung mindestens zwei Gefahren ausgesetzt (Weltbank, 2011).

Wie in anderen Entwicklungsländern auch stellt der Klimawandel eine ernstzunehmende Gefahr für die Bevölkerung Panamas und das Wirtschaftssystem und die Umwelt des Landes dar. Als besonders gefährdete Sektoren gelten insbesondere die Landwirtschaft, die Wasserressourcen, der Waldbestand, die Ökosysteme der Küstengewässer und der Gesundheitssektor (Weltbank, 2011). Es ist davon auszugehen, dass sich der Klimawandel in diesem Land in Form von schwereren Stürmen, Überschwemmungen und Dürren auswirken wird. Die weitreichendsten Folgen werden dabei die ärmsten und marginalisierten Bevölkerungsgruppen zu tragen haben.

Im Zusammenhang mit den Auswirkungen des Klimawandels auf das Land gilt eine besondere Sorge den möglichen klimabedingten Folgen für eine der wichtigsten ökonomischen Ressourcen des Landes: den Panamakanal. Der Panamakanal gehört zu den wichtigsten Arterien im internationalen Seewarenverkehr. Täglich fahren beinahe 40 Seeschiffe durch den Kanal. Aufgrund seiner Bedeutung existieren bereits zahlreiche Studien, die sich mit seiner Rolle für die Wirtschaft auf lokaler und globaler Ebene befassen (z. B. CEPAL 1965, Brandes 1967, Nathan Associates 2003). Darüber hinaus hat die Panama Canal Authority (Autoridad del Canal de Panamá, ACP) im Zuge der laufenden Erweiterung des Kanals Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsstudien in Auftrag gegeben (ACP 2006, Nathan Associates und ACP 2011). Da Panama ein Entwicklungsland ist, hat der Kanal eine besondere Relevanz (Vereinte Nationen, Wirtschafts- und Sozialrat 1979).

Panama-Kanal

Anpassung an den Klimawandel im Panamakanal

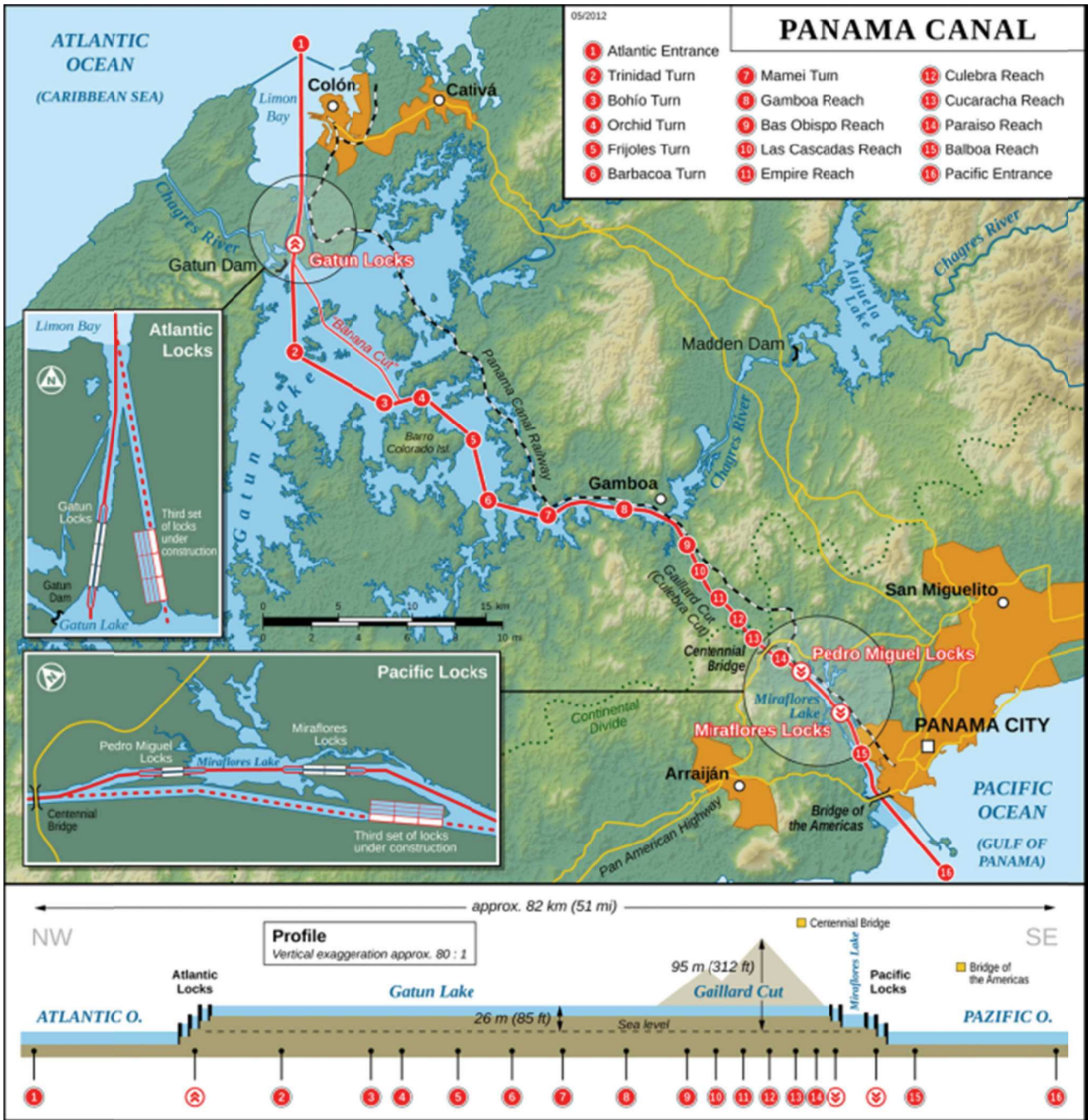


Abbildung 1: Der Panamakanal im Überblick

Quelle: Thomas Römer/OpenStreetMap-Daten

Der Kanal ist ein komplexes System aus Schleusen und künstlichen Wasserläufen, die Schiffe mit Höchstmaßen von ca. 294,13 m Länge, 33,53 m Breite und mit einem maximalen Tiefgang von 12,56 m – so genannte *Panamax*-Schiffe – befahren können. Er erhebt sich im Gatún-See 26 m über dem Meeresspiegel und durchquert den Isthmus von Panama auf einer Länge von 82 km. Nach Fertigstellung des aktuellen Erweiterungsprogramms – trotz einiger Verzögerungen wird eine verbreiterte dritte Schleusenanlage bald betriebsbereit sein – werden *New-Panamax*-Schiffe von 366 m Länge, 49 m Breite und einem Tiefgang von 15,2 m den Kanal befahren können.

Abbildung 1 oben gibt einen Überblick über den Kanal vom Atlantik bis zum Pazifik, der den Isthmus von Pa-

nama von Nordwest nach Südost auf einer Länge von 77,1 km durchquert. Der Kanal ist ein komplexes technisches Bauwerk und besteht aus verschiedenen künstlichen Seen, die über künstliche Kanäle verbunden sind, und drei Schleusenanlagen. Zusätzlich ist der künstliche Alajuela-See an das Kanalsystem angeschlossen. Er dient als Reservoir für den Kanal.

Vom Atlantischen Ozean her steuern die Schiffe den Kanal über die Limón-Bucht an, vorbei am Tiefseehafen von Cristobal und den intermodalen Einrichtungen der Colón-Freizone. Nach etwa 8,5 km ist der 3,2 km lange Anfahrtskanal zu den Gatún-Schleusen erreicht. Dort werden die Schiffe mithilfe der dreistufigen, 1,9 km langen Schleusen auf den 26,5 m über dem Meeresspiegel liegenden Gatún-See gehoben. Dieser

künstlich aufgestaute See stellt den größten Abschnitt des Kanals dar (24,2 km). Er verliert Wasser durch Verdunstung und den Schleusenbetrieb. Der See speist sich im Wesentlichen aus dem Fluss Chagres, den die Schiffe auf einem Abschnitt von 8,5 km bis zum Culebra Cut befahren, einem 12,6 km langen Durchstich durch die Berge. Dann ist die einstufige, 1,4 km lange Pedro-Miguel-Schleuse erreicht und der Abstieg zum Pazifischen Ozean beginnt. Über die Pedro-Miguel-Schleuse erreichen die Schiffe den Miraflores-See, der sich 9,5 m tiefer befindet. Er führt zu den Miraflores-Schleusen. Unter anderem an diesen zweistufigen Schleusen lässt sich der Kanalbetrieb am besten beobachten. Die Schiffe werden dort die fehlenden 16,5 m bis zum Ozean abgesenkt. 13,2 km von den Miraflores-Schleusen entfernt und nach der Durchfahrt durch den Hafen Balboa verlassen die Schiffe den Kanal und fahren auf der pazifischen Seite hinaus in den Golf von Panama.

Der Kanal ist natürlich nicht nur ein komplexes technisches Bauwerk, sondern er ist darüber hinaus organisatorisch, wissenschaftlich, ökologisch und politisch relevant (Carse 2012). Das heißt, dass eine solche monumentale Infrastruktur zwangsläufig den ökologischen, sozialen, politischen und natürlich auch wirtschaftlichen Kontext des Landes beeinflusst. Als großes, von Menschenhand geschaffenes Bauwerk hat der Panamakanal durch die Schaffung eines komplexen Wasserbewirtschaftungssystems die lokale Umwelt drastisch verändert: Es entstanden zwei große künstliche Seen, natürliche Flussläufe wurden umgeleitet, und auch an der Tier- und Pflanzenwelt an den Küsten und im Landesinneren geht die Entwicklung nicht spurlos vorüber.

Als in die Natur eingebettetes, soziotechnisches System ist der Kanal zweifelsohne anfällig für klimawandelbezogene Risiken. Die Folgen des Klimawandels wurden 1997-1998 deutlich, als aufgrund des Klimaereignisses El Niño mit dem Einbruch des Agrarrohstoffhandels auch die Einnahmen des Kanals zurückgingen und sich die Canal Authority aufgrund der niedrigen Wasserstände im Gatún-See sogar gezwungen sah, den Tiefgang der Schiffe zu beschränken, die den Kanal passierten (de Marucci, 2002).

Die Panama Canal Authority führte klimawandelbezogene Risikomanagementverfahren als Teil der Studien über die Umweltauswirkung der Kanalerweiterung ein. Im Rahmen der Erweiterungspläne wurde ein integriertes Anpassungsprogramm entwickelt. In der wissenschaftlichen Literatur hingegen ist diesen Risiken und den Folgen von durch den Klimawandel bedingten Störungen des Kanalbetriebs für die Volkswirtschaft Panamas, wie auch für den internationalen Handel, bisher wenig Beachtung zuteil geworden. Das Ausmaß solcher Folgen ist zwar im Detail schwierig zu messen, der Panamakanal ist jedoch ein sehr eingängiges Beispiel dafür, wie wichtig Anpassungsmaßnahmen sind und in welcher Größenordnung die Kosten liegen könnten, wenn keine Maßnahmen ergriffen werden.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, die Folgen des Klimawandels für den Kanalbetrieb zu benennen und die ggf. dadurch entstehenden Kosten zu beziffern, insbesondere bei Schließung des Kanals. Dies ist die Grundlage für jede Analyse zur Bezifferung der Höhe des wirtschaftlichen Nutzens weiterer Anpassungs-

maßnahmen in der Kanalregion. Neben der Einleitung umfasst dieses Dokument drei weitere Abschnitte. Abschnitt 2 behandelt die für den Panamakanal relevanten klimawandelbedingten Folgen. Es wird die dünne wissenschaftliche Datenlage über die möglichen Folgen für den Kanal erläutert und auf die Notwendigkeit weiterer quantitativer Studien hingewiesen. In Abschnitt 3 werden die Kosten einer möglichen Störung des Kanalbetriebs auf lokaler und internationaler Ebene diskutiert. In Abschnitt 4 werden Schlussfolgerungen gezogen und Forschungsthemen genannt, die es zu vertiefen gilt.

2. Folgen des Klimawandels für den Betrieb des Panamakanals

2.1 Klimatische Ausgangslage

Panama hat ein tropisches Klima. Das Jahr lässt sich in zwei Perioden einteilen: die Trockenzeit (Dezember bis April) und die Regenzeit (Mai bis November). Die Regenzeit bringt landesweit 250-700 mm Niederschlag. Die durchschnittliche Niederschlagsmenge beträgt 1900 mm im Jahr. Das Klima ist in der Regel heiß und feucht, bei einer Durchschnittstemperatur von circa 27°C und Höchsttemperaturen zwischen 31°C und 35°C sowie einer Mindesttemperatur um 20°C. Niederschlag und Temperatur unterliegen gewissen Schwankungen je nach Region und Höhenlage. Abbildung 2 zeigt die Temperaturen und den durchschnittlichen Niederschlag in den Regionen Colon und Panama, durch die der Kanal verläuft.

In der Umweltfolgenstudie der ACP sind Daten zu Niederschlag, Temperaturen, Feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit sowie weitere Indikatoren für drei Stationen entlang des Kanals enthalten (Balboa, Gamboa und Limon Bay), die ein ähnliches Profil ergeben, wie es in Abbildung 2 gezeigt ist. In der Bewertungsstudie (ACP 2006, S. 62) wird darauf verwiesen, wie wichtig der Niederschlag an der Wasserscheide des Kanals (Cuenca) ist. Ausbleibender Niederschlag, insbesondere in der Trockenzeit, ist durch die Passatwinde und die Bewegung der innertropischen Konvergenzzone (ITCZ) am Isthmus bedingt.

Das Klima wird maßgeblich durch die ITCZ beeinflusst, die der Grund für das zweigeteilte Klima in Panama ist und für den Niederschlag im Sommer sorgt. Die Dürre im Süden und die Überschwemmungen im Norden des Landes sind durch El Niño/La Niña bedingt (de Marucci, 2002). Darüber hinaus profitiert das Land von den milden Meereseinflüssen, die temperaturregulierend wirken. Ab und zu ziehen tropische Stürme über die Kanalzone, die zu Erdbeben und schweren Regenfällen führen können. Das Land zählt jedoch nicht zu den Wirbelsturm-Gefahrengebieten. Zu den schwerwiegendsten Wetterereignissen, welche die Kanalzone betreffen können, gehören daher Dürren, insbesondere als Folge eines zu niedrigen Wasserstands im Gatún-See. Wie viel Wasser der Gatún-See führt, hängt von zahlreichen Faktoren ab. Im besonderen Maße ausschlaggebend ist der Niederschlag im Bereich der Wasserscheide, aber auch Temperaturen und Wind, in Bezug auf die Verdunstung, und natürlich die Wasserbewirtschaftung spielen eine wichtige Rolle.

Panama-Kanal

Anpassung an den Klimawandel im Panamakanal

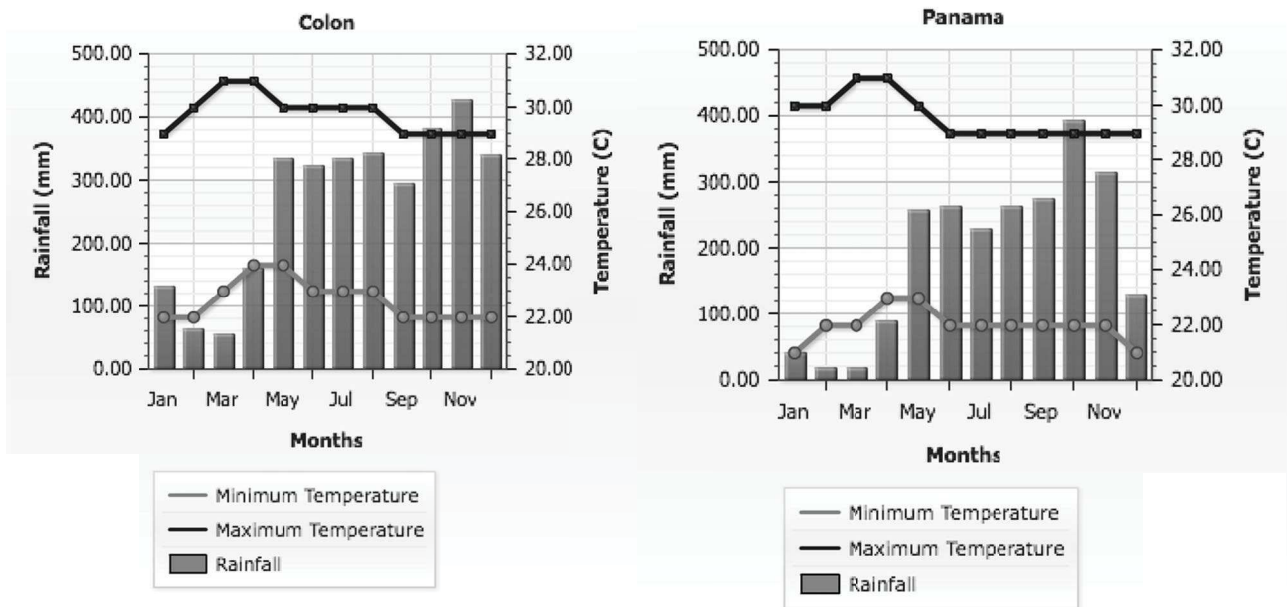


Abbildung 2: Niederschlag, Mindest- und Höchsttemperaturen in den Regionen des Panamakanals

Quelle: World Bank Climate Change Knowledge Portal, Panama Dashboard

2.2 Klimawandel

Für die Zukunft wird in Panama mit einem weiterhin feuchten Klima bei einem allgemeinen Anstieg der Niederschlagsmenge um nahezu 80 % bis 2080 gerechnet (Weltbank, 2011), wobei dieser Anstieg vor allem in den Monaten Januar, April und Mai zu verzeichnen sein wird. Der Meeresspiegel wird bis zum Ende des Jahrhunderts um 35 cm steigen – mit deutlichen Folgen für die Mündungsgebiete und die Aquakultur. Für die Trockenzeit wird ein Temperaturanstieg zwischen 0,4°C und 1,1°C bis 2020, 1°C - 3°C bis 2050 und 1°C - 5°C bis 2080 prognostiziert. Es handelt sich dabei jedoch um unsichere Prognosen. So ist es durchaus möglich, dass das Ausmaß des Klimawandels in Panama, wie auch anderswo in der Welt, unterschätzt wird. Wie in Abbildung 4 unten gezeigt, weichen die Niederschlagsmodelle stark voneinander ab.

Die Folgen können jedoch katastrophal sein, daher zählt die Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) Panama zu den weltweit anfälligsten Regionen für die Folgen des Klimawandels. Die Weltbank (2011) erkennt für Panama die folgenden sekundären, durch den Klimawandel bedingten Folgen:

- Häufigere und umfassendere Ernteaussfälle
- Erhöhte Hitzebelastung für landwirtschaftliche Erzeugnisse und vulnerable Bevölkerungsgruppen
- Verlust an Biodiversität und Waldflächen
- Reduzierte Wasserqualität und -menge
- Erhöhte Inzidenz klimabezogener Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit

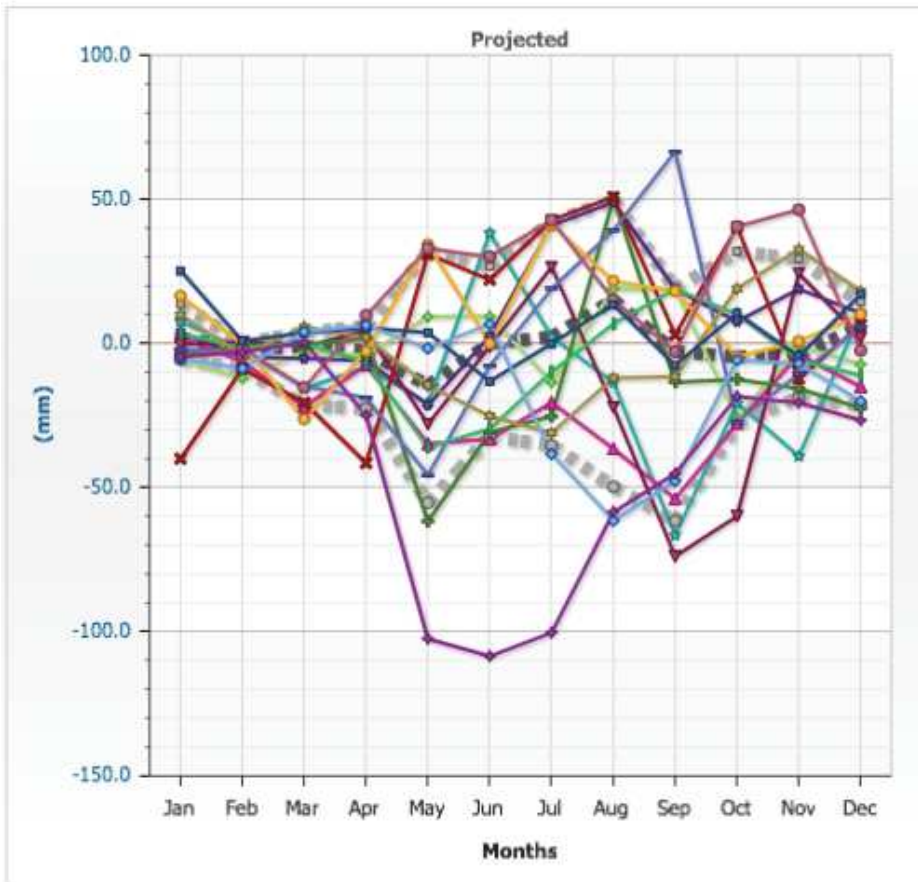
Aus den allgemeinen Folgen des Klimawandels in Panama lassen sich folgende spezifische Auswirkungen

für den Betrieb des Panamakanals und den Frachtransport durch den Kanal ableiten.

- Verringerung des Frachtaufkommens, das durch den Kanal transportiert wird, vergleichbar mit den El Niño-Jahren 1997-1998, mit entsprechenden Einnahmeverlusten
- Unruhen und Umsiedlung von Teilen der Bevölkerung
- Schwere Regenfälle und Windböen, die Logistik- und Umschlagareale betreffen und die Sichtverhältnisse beeinträchtigen oder den Kanalbetrieb behindern könnten
- Nebel, der in den Kanalregionen häufig auftritt und zu Betriebsstörungen führen kann (Cheng & Georgakakos, 2011)
- Dürreperioden, während derer der Kanal nur eingeschränkt befahrbar ist, so dass unter Umständen Beschränkungen beim Tiefgang der Schiffe eingeführt werden müssen
- Überschwemmungen, die unter Umständen die an den Kanal angrenzenden Regionen betreffen und möglicherweise zur Umsiedlung der dort lebenden Bevölkerung und Unruhen führen (Shamir et al. 2013)
- Erdbeben, die unter Umständen in den Kanalregionen auftreten (Duncan, 2010; Berman, 1995; Stallard & Kinner, 2005)

Panama-Kanal
Anpassung an den Klimawandel im Panamakanal

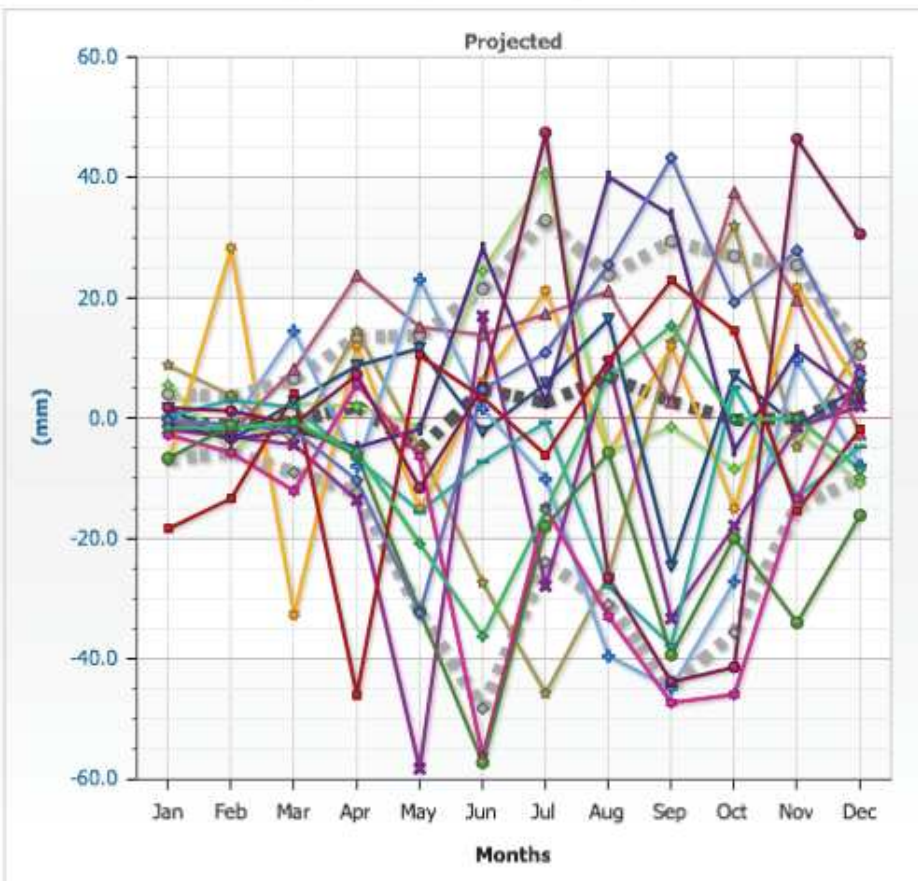
Future (2040-2059) Rainfall change Projections



Legend
Global Climate Models

- bccr_bcm2.0
- ccma_cgcm3.1
- cnrm_cm3.0
- csiro_mk3.5
- gfdl_cm2.1
- gfdl_cm2.0
- giss
- ingv_echam4.0
- inmcm3.0
- ipsl_cm4.0
- miub_echo
- miroc_3.3medres
- mpi_echam5
- mri_cgcm2.3.2a
- ukmo_hadcm3
- ukmo_hadgem1
- ncep_pr
- Ensemble Low (10%)
- Ensemble Median
- Ensemble High (90%)

Future (2020-2039) Rainfall change Projections



Panama-Kanal
Anpassung an den Klimawandel im Panamakanal

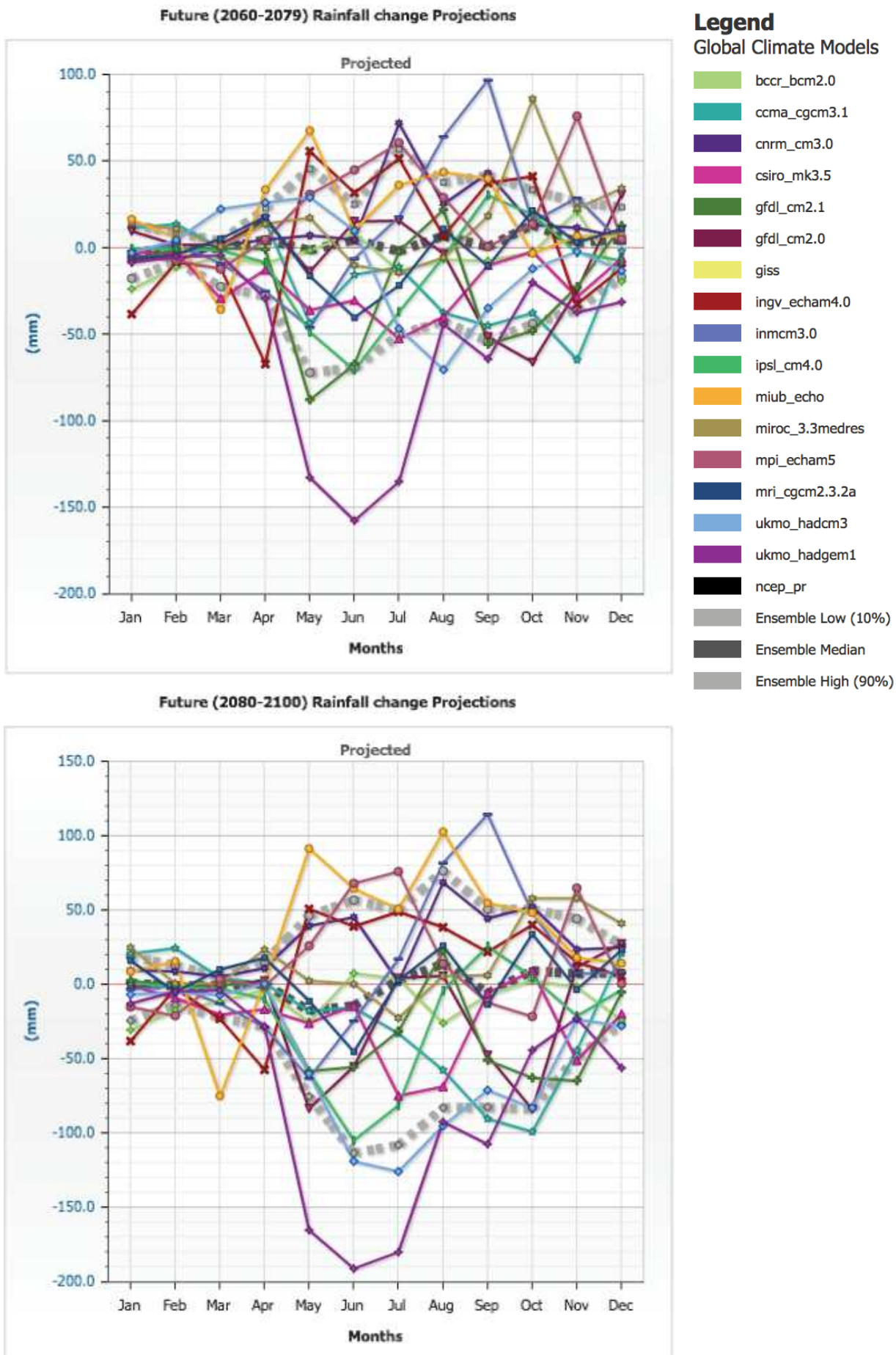


Abbildung 4: Niederschlagsprognosen im Vergleich, 2020-2100.

Quelle: World Bank Climate Change Knowledge Portal, Panama Dashboard.

Von den genannten Punkten ist der Faktor Dürre für den Kanalbetrieb im besonderen Maße relevant. Wegen des tropischen Klimas und da der Kanal mit Schleusen betrieben wird, war es bereits zum Zeitpunkt des Baus klar, dass die Nutzung des Kanals durch die Wassermenge begrenzt werden würde, die – insbesondere in der Trockenzeit – für den Schleusenbetrieb zur Verfügung steht. Die mehr als 200.000 m³ Wasser, die für jede Durchfahrt erforderlich sind, liefert der Chagres-Fluss über zwei künstliche Becken. Die Wasserressourcen, insbesondere im Gatún-See, sind jedoch begrenzt.

Verschiedene Studien (z. B. World Bank 2013) rechnen mit der Möglichkeit, dass sich die Niederschlagsmengen in der Trockenzeit verringern werden. In einer neuen Studie, DNV-GL (2014), wird prognostiziert, dass es zu Wasserknappheit im Gatún-See kommen wird, wenn keine Anpassungsmaßnahmen ergriffen werden (Abb. 5). Die Studie zeigt, dass der Wasserstand ohne Anpassungsmaßnahmen bereits erheblich gesunken wäre.

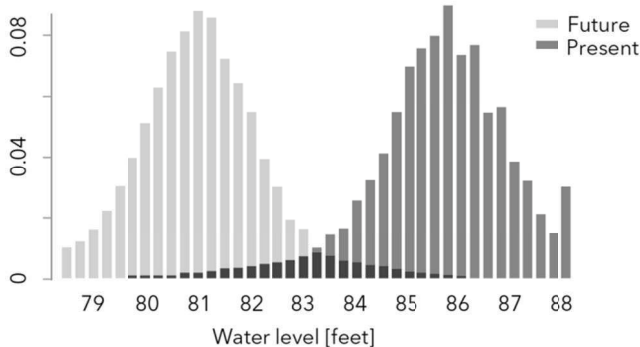


Abbildung 5: Wahrscheinlichkeitsverteilung des in den vergangenen Jahrzehnten beobachteten und für das Ende dieses Jahrhunderts prognostizierten Wasserstands im Gatún-See – ohne Anpassungsmaßnahmen

Quelle: DNV-GL, 2014 (S. 60).

2.3 Anpassungsmaßnahmen

Panama hat aktiv auf den Klimawandel reagiert und Schutz- und Anpassungsmaßnahmen entwickelt und umgesetzt. Zu den Anpassungsmaßnahmen zur Milderung der Folgen für die Landwirtschaft in der Region gehören die Verbesserung der Bewässerungseffizienz, der Anbau neuer, für den Klimawandel weniger anfälliger Pflanzensorten, die Entwicklung von Schutzmaßnahmen gegen Seuchen und Pflanzenkrankheiten und die Aufteilung der landwirtschaftlich genutzten Flächen unter Berücksichtigung erhöhter klimabedingter meteorologischer Schwankungen. Auch im Küstenmanagement wirken sich Anpassungsmaßnahmen positiv aus. Vorgeschlagen wird zum Beispiel die Umsetzung eines Programms für die integrierte Bewirtschaftung der Küstengebiete (Integrated Coastal Zone Management Program), unter anderem zur Verbesserung der Situation der Fisch- und Shrimp-Farmen, des Wasserzulaufs und -ablaufs in den Mangroven, sowie für eine bessere Stadtplanung (Baulinien, Abwasserbehandlung, Kanalisation und Regenwasser-Management).

Für den Kanal ist das Thema der Wasserbewirtschaftung von höchster Relevanz. Der Kanal ist faktisch nur ein, wenn auch bedeutender, Verbraucher von Frischwasser, und ein integrierter Ansatz zur Bewirtschaftung der Wasserressourcen ist angeraten. Im Anpassungsbericht der Weltbank (2011) werden in Bezug auf die Wasserbewirtschaftung folgende Maßnahmen vorgeschlagen:

- Erhöhung des Wasserangebots, z. B. durch die Nutzung von Grundwasser, den Bau von Wasserreservoirs, die Verbesserung oder Stabilisierung der Bewirtschaftung von Wassereinzugsgebieten, Entsalzung von Meerwasser;
- Reduzierung der Wassernachfrage, z. B. durch eine effizientere Nutzung, weniger Wasserverluste, Wasseraufbereitung, Änderung der Bewässerungspraxis;
- Verbesserung oder Weiterentwicklung der Wasserbewirtschaftung;
- Entwicklung und Einführung von Systemen zur Überwachung und Kontrolle von Überschwemmungen und Dürren;
- Ausbau des Netzwerks von Wasser- und Wetterstationen, um zukünftige Veränderungen im Wasserhaushalt, einschließlich Überschwemmungen und Dürren, besser vorhersagen zu können;
- Entwicklung neuer Bewässerungstechnologie;
- Förderung des Schutzes und vernünftigen Umgangs mit der Ressource Wasser.

Die ACP hat im Erweiterungsplan bereits einige Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt, um eine verbesserte Wasserbewirtschaftung zu erreichen. Damit sichergestellt ist, dass im Kanalsystem während der Trockenzeit ausreichend Wasser zur Verfügung steht, gehören zum Erweiterungsprogramm für den Panamakanal die Erhöhung des Höchstpegels für den Betrieb im Gatún-See um 45 cm, die Entwicklung von Wasserrückhaltebecken für die neuen Schleusen und die Vertiefung und Ausweitung der Fahrrinnen (Simonit und Perrings, 2013a).

Mehrere Studien weisen unterdessen auf die besondere Bedeutung einer Bewirtschaftung der Wassereinzugsgebiete für den reibungslosen Kanalbetrieb hin. Dieser Aspekt ist im Kontext der Relevanz für Panama bereits verschiedentlich wissenschaftlich untersucht worden, unter besonderer Hervorhebung der Rolle, welche die Umwelt für den Kanalbetrieb spielt (Carse 2012). Auch wenn die Auswirkungen der Wiederaufforstung zum Schutz der Wasserressourcen nicht unumstritten sind (siehe zum Beispiel Simonit und Perrings, 2013a; 2013b; Ogden und Stallard, 2013), ist es auf diesem Wege gelungen, die Umweltfolgen des Kanalerweiterungsprojekts zu verringern. Das hat die internationalen Versicherungskosten gesenkt (Europaid, 2009).

3. Wirtschaftliche Folgen von Betriebsstörungen im Panamakanal

Ausschlaggebend für das Ausmaß der wirtschaftlichen Folgen einer Störung des Kanalbetriebs wären im Einzelfall die Schwere und Art der Störung sowie deren

Dauer. Im Rahmen der vorliegenden Studie werden die Folgen auf drei Ebenen betrachtet: auf Ebene der ACP, auf Ebene der Republik Panama und auf globaler Ebene. Die auf Ebene der ACP untersuchten Folgen beziehen sich im Wesentlichen auf Einnahmeverluste. Für Panama ergeben sich Folgen für die Volkswirtschaft des Landes und die Wirtschaftsaktivitäten im Zusammenhang mit dem Kanal. Schwerpunktmäßig geht es dabei um Arbeitsplätze und die Wertschöpfung in der Republik Panama. Auf globaler Ebene untersucht die vorliegende Studie, wie sich eine Störung des Kanalbetriebs auf die Rolle des Panamakanals für die globalen Lieferketten auswirkt, insbesondere in Konkurrenz zur US-Landbrücke zwischen Asien und der Ostküste der USA und als Verbindung im Süd-Süd-Verkehr zwischen Europa und Nordamerika mit Südamerika.

In Bezug auf die Schwere der Störungen werden zwei Szenarien untersucht: die komplette Schließung des Kanals oder eine Beschränkung im Hinblick auf die Anzahl und den Typ der Schiffe, die den Kanal passieren dürfen, auf Grundlage der Kriterien Tiefgang oder Größe. Die komplette Schließung des Kanals ist ein sehr seltenes Ereignis, das in der Vergangenheit nur unter außergewöhnlichen Umständen stattgefunden hat. Eine solche Schließung erfolgt in der Regel nur für kurze Zeit (zwischen einigen Stunden bis zu einem Tag) und es fällt schwer, sich ein Szenario vorzustellen, ausgenommen einen schweren Unfall oder bewaffneten Konflikt, das zur vollständigen Unerreichbarkeit des Kanals führen würde, ohne dass die ACP schnell handelt, damit der Kanal wieder zur Verfügung steht. Eine Beschränkung in Bezug auf die Schiffstypen und die Anzahl der zur Durchfahrt zugelassenen Schiffe bei widriger Witterung, kleineren Unfällen oder einem Versagen der Infrastruktur ist deutlich wahrscheinlicher.

Unter dem Aspekt der Schwere und der Dauer der Störungen werden drei Szenarien untersucht: 1) vorübergehende Schließung des Kanals (zwischen 1 Stunde und einigen Tagen); 2) vorübergehende Beschränkung des Kanalbetriebs (z. B. begrenzte Anzahl Schiffe oder Reduzierung des zulässigen Tiefgangs) (zwischen einigen Tagen und einigen Wochen); und 3) langfristige Einschränkung des Kanalbetriebs (über mehrere Wochen bis zu mehr als einem Jahr). Die dauerhafte Schließung des Kanals für einen längeren Zeitraum als wenige Tage wird berücksichtigt, ist jedoch nicht als mögliches Szenario aufgenommen, da die ACP in der Lage ist, schnellstmöglich die Wiedereröffnung des Kanals herbeizuführen. Im restlichen Abschnitt werden für jede geografische Ebene die geschätzten wirtschaftlichen Folgen von Störungen des Kanalbetriebs erörtert.

3.1 Lokale Ebene

Eine der Haupteinnahmequellen für die ACP und Panama sind die Kanalgebühren. Die ACP legt diese Gebühren fest, die sich nach dem Schiffstyp, der Schiffsgröße und der Art der Ladung richten. Im Fall von Containerschiffen ist die Kapazität des Schiffes in TEU (72,- US-Dollar pro TEU) maßgeblich. Ein Panamax-Containerschiff hat ein Ladungsvolumen von bis zu 4400 TEU. Die Gebühr für Passagierschiffe und Containerschiffe ohne Ladung berechnet sich anders (derzeit 57,60 US-Dollar pro TEU). Bei Kreuzfahrtschiffen zählt für die Berechnung die Anzahl der

Passagiere, die in regulären Betten untergebracht werden können. Diese Gebühr beträgt derzeit 92 US-Dollar pro nicht belegtem Bett und 115 US-Dollar pro belegtem Bett. Für Passagierschiffe von weniger als 30.000 Tonnen oder weniger als 33 Tonnen pro Passagier gilt dieselbe Regelung pro Tonne wie für Frachtschiffe. Die Mehrzahl der übrigen Schiffe zahlt eine Gebühr, die sich nach der Tonnage richtet.

Seit dem Steuerjahr 2008 beträgt die Gebühr 3,90 US-Dollar pro Tonne für die ersten 10.000 Tonnen, 3,19 US-Dollar pro Tonne für die nächsten 10.000 Tonnen, 3,82 US-Dollar pro Tonne für die dritten 10.000 Tonnen und anschließend 3,76 US-Dollar pro Tonne. Wie bei Containerschiffen gilt eine reduzierte Gebühr für Frachtschiffe, die "in Ballast" fahren. Für kleine Schiffe mit bis zu 583 PC/UMS Nettotonnen, wenn sie Passagiere oder Ladung transportieren, bzw. bis zu 735 PC/UMS Nettotonnen, wenn sie in Ballast fahren, oder bis zu 1048 Tonnen Verdrängung im vollbeladenen Zustand, werden Mindestgebühren auf Grundlage der Schiffslänge erhoben. Diese reichen von 1300 US-Dollar für Schiffe unter 50 Fuß bis 2400 für Schiffe über 100 Fuß, mit zwei Zwischentarifen von 1400 und 1500 US-Dollar.

Zwar stellen die Gebühren die Haupteinnahmequelle des Kanals dar, sie können jedoch nicht unbegrenzt erhöht werden, da es auch alternative Routen zum Seeweg durch den Panamakanal gibt. Die Gebühren für Containerschiffe erhöhten sich 2009 von 40 US-Dollar pro TEU auf 72 US-Dollar und schließlich auf 74 US-Dollar in 2011. Diese Erhöhung hat bereits über 40 % der potenziellen Kostenersparnis im Zusammenhang mit den Skalenvorteilen abgeschöpft, die nach der Erweiterung möglich sind (Rodrigue, 2010).

Die Gesamteinnahmen für die ACP betragen im Jahr 2010 1962 Mio. US-Dollar, 2319 Mio. US-Dollar in 2011 und 2411 Mio. US-Dollar in 2012. Drei Viertel davon waren Einnahmen durch Gebühren (Panama Canal Authority (ACP), 2012). Die übrigen 25 % stammten zum überwiegenden Teil aus Dienstleistungen im Zusammenhang mit der Durchfahrt (395 Mio. US-Dollar in 2012) und sonstigen Einnahmen, d. h. Zinsen, Verkauf von Wasser und Strom (163 Mio. US-Dollar in 2012). 93 % der Einnahmen der ACP im Jahr 2012 stammten aus Gebühren oder Dienstleistungen, welche die Betreibergesellschaft im Zusammenhang mit der Durchfahrt erbracht hatte. Dies zeigt, dass die ACP eine sehr homogene Geschäftstätigkeit aufweist.

Die Gesamttonnage der Schiffe (gemessen in PC/UMS) betrug im Jahr 2012 332,5 Millionen und es wurden dadurch 2398,9 Mio. US-Dollar erwirtschaftet: Eine einfache Berechnung ergibt, dass folglich pro Tag durchschnittlich 910 Tausend Tonnen durch den Kanal transportiert wurden, was Tageseinnahmen in Höhe von etwa 6,6 Mio. US-Dollar (ca. 7,25 US-Dollar pro Tonne) entspricht. Die Gesamtausgaben betragen 682,6 Mio. US-Dollar, etwas über 2,05 US-Dollar pro Tonne. Das Nettoeinkommen für den Kanal betrug im Jahr 2010 964 Mio. US-Dollar und stieg auf 1229 bzw. 1258 Mio. US-Dollar in 2011 bzw. 2012 – etwas über 3,78 US-Dollar pro Tonne bzw. 3,45 Mio. US-Dollar pro Tag auf Grundlage der Zahlen aus 2012 (die Differenz ergibt sich aus Steuern, Amortisierung und Abschreibung) (Panama Canal Authority (ACP), 2012).

2012 durchquerten 14.544 Schiffe den Kanal. Bei 56,3 % von diesen handelte es sich um Panamax-Schiffe (größte zulässige Schiffe). Aufgeteilt nach Schifffahrtssektoren machten die Containerschiffe 36 % des Kanalverkehrs aus, gefolgt von Massengutfrachtern (25 %), Tankern (15 %) und Fahrzeugtransportschiffen (11 %). 119,9 Millionen Tonnen Container-Ladung wurden durch den Kanal transportiert (durchschnittlich 35.000 Tonnen pro Containerschiff¹). Die Durchfahrt von 3331 Containerschiffen durch den Kanal bedeutet, dass im Jahr 2012 jedes Containerschiff dem Kanal im Durchschnitt eine Nettoeinnahme von über 132.000 US-Dollar einbrachte. Panamax-Schiffe bedeuten eine durchschnittliche Nettoeinnahme von knapp 200.000 US-Dollar pro Durchfahrt. Da diese Schiffe im Fall von Durchfahrtsbeschränkungen vorrangig betroffen wären, leuchtet unmittelbar ein, wie wichtig das Erweiterungsprogramm ist. Post-Panamax-Containerschiffe böten eine dreimal höhere Ladekapazität als die Panamaxschiffe, die derzeit den Kanal befahren (von 4000 TEU bis 12.000 TEU), daher wäre die Durchfahrt dieser neuen Schiffe durch den neuen Kanal noch erstrebenswerter.

Aus diesen einfachen Berechnungen wird deutlich, dass die ACP pro Betriebsstunde ungefähr 150.000 US-Dollar verdient. Eine Störung gleich welcher Art führt somit zu erheblichen Verlusten. Selbst wenn sonstige Einnahmequellen eingerechnet und die Möglichkeiten eines Aufschubs oder einer Erhöhung der Gebühren (z. B. durch das Auktionssystem) für die Schiffe berücksichtigt würden, die den Kanal aufgrund der Störung nicht nutzen können, wären die Verluste für die ACP dennoch erheblich.

Während diese Überlegungen größtenteils auf unerwarteten Störungen basieren, deren Behebung sich potenziell relativ schnell einrichten ließe, sind langfristige wirtschaftliche Folgen im Zuge möglicher Abhilfemaßnahmen der ACP schwieriger abzuschätzen. Im speziellen Fall klimabedingter Störungen ist die Rentabilität des Kanals so hoch, dass der Betrieb noch für einen relativ langen Zeitraum aufrechterhalten werden könnte. Anhaltende Störungen jedoch würden durch eine reduzierte Kapazität des Kanals nicht nur direkt die Einnahmen der ACP schmälern, sondern für Frachtunternehmen einen Anreiz schaffen, auf andere, zuverlässigerer Korridore auszuweichen. Anhaltende Störungen oder zunehmend häufigere Störungen würden die Wettbewerbsfähigkeit des Kanals beeinträchtigen. Das könnte für den Kanal kritische Folgen haben: Im Rahmen des Erweiterungsprojekts, durch das es Post-Panamax-Schiffen ab 2014 möglich sein wird, den Kanal zu befahren, wird von deutlichen Zuwachsraten in Bezug auf die Anzahl der Schiffe und die Gesamttonnage ausgegangen (Pagano, et al. 2012).

Unter Verwendung des geschätzten Wachstums bei den Durchfahrtszahlen und Beladungsvolumina nach der Fertigstellung, das Pagano *et al.* (Pagano, et al.

2012) berechnet haben, nimmt die Anzahl der Schiffe, die den Kanal passieren, um 13,1 % und die Tonnage wie auch die Einnahmen aus Gebühren bis 2020 im Bereich von 35 % zu. Bis 2025 wird mit einem weiterer Anstieg um 21,5 % in Bezug auf die Anzahl der Schiffe und 55 % in Bezug auf die transportierte Gesamttonnage und die Einnahmen aus Gebühren gerechnet. Voraussetzung für diese Steigerungen ist die zusätzliche Frachtmenge durch Post-Panamax-Schiffe. Wäre aus irgendeinem Grund die Durchfahrt dieser Schiffe nicht möglich, wären die Wachstumsprognosen hiervon stärker betroffen als in der Vergangenheit. Somit erhöht sich mit der Größe des Kanals auch die Schwankungsbreite der Einnahmen aus dem Kanal, da diese Einnahmen in einem höheren Maße von großen Schiffen abhängen werden.

3.2 Panama-Ebene

Ausschlaggebend für den volkswirtschaftlichen Erfolg der Republik Panama sind vorrangig ihre geografische Lage, die dollarisierte Wirtschaft – Zeichen der engen Verflechtung mit den USA – und der Panamakanal, der dazu beigetragen hat, dass Panama zu einer Drehscheibe des internationalen Handels und einem logistischen Knotenpunkt aufgestiegen ist. Somit ist der Panamakanal eine Hauptantriebsfeder der wirtschaftlichen Entwicklung des Landes und aus diesem Grund dessen wichtigste Infrastruktureinrichtung. Panama hat eine Bevölkerung von etwa 3,4 Millionen. 57 % davon leben in den Provinzen Panama und Colon. Diese Provinzen, zu denen auch die Gebiete, die der Kanal bedient, und die Freihandelszone gehören, erwirtschaften 87 % des Bruttoinlandsprodukts Panamas (Pagano *et al.* 2012).

Für Panama hat der Kanal durch die direkten Geldtransfers in Form von Kanalgebühren einen enormen wirtschaftlichen Nutzen. Der Kanal spielt darüber hinaus eine wichtige Rolle in Bezug auf die induzierte und indirekte Wirkung der wirtschaftlichen und logistischen Aktivitäten im Zusammenhang mit dem Kanal. Ausgehend von der Bedeutung des Kanals für den Staat Panama wurde in einer 2006 von der ACP durchgeführten Studie geschätzt, dass mit der Kanalerweiterung eine Verdreifachung der Cluster-Exporte bis zum Jahr 2025 möglich sein könnte. Durch die Kanalerweiterung kann Panama bis 2025 ein BIP von 31.700 Mio. US-Dollar zum Stand des Dollars in 2005 erreichen. Das ist beinahe 2,5 Mal das BIP des Landes in 2005 und entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 5 % über die nächsten 20 Jahre.

Eine neuere Studie (Pagano *et al.* 2012) kommt zu ähnlichen Ergebnissen. In dieser Studie wird der Gesamtbeitrag der Kanalerweiterung zur Volkswirtschaft Panamas mittels eines Input-Output-Ansatzes und einer erweiterten Analyse durch ein allgemeines Gleichgewichtsmodell (GEM) bewertet. Die Studie stellt fest, dass 82 % der Wirtschaft Panamas und 33 % seiner Exporte Dienstleistungen sind (ausgenommen in der zollfreien Zone generierte Exporte). Über 75 % der Gesamtexporte stehen im Zusammenhang mit den Aktivitäten des Clusters in der Interoceanic Transit Region, die wiederum von der Aktivität des Kanals abhängen. Etwa 9800 Personen sind am Kanal beschäftigt und der Beitrag der ACP zur Staatskasse Panamas betrug in den Jahren 2011 und 2012 etwas

¹ Hierbei handelt es sich um Überschlagsrechnungen. 35.000 Tonnen pro Containerschiff sind jedoch eine realistische Schätzung der Durchschnittsgröße der Containerschiffe, die den Kanal passieren. Panamax-Schiffe haben üblicherweise eine DWT zwischen 65.000 und 80.000 Tonnen. Es ist noch zu erwähnen, dass Panamax-Schiffe aufgrund von Tiefgangbeschränkungen im Kanal nicht mehr als 52.000 Tonnen transportieren dürfen.

über einer Milliarde US-Dollar (Panama Canal Authority (ACP), 2012). Weitere 137 Mio. US-Dollar in Form indirekter Beiträge (z. B. durch Einkommenssteuer usw.) sollten noch hinzugerechnet werden. Die Nettolöhne der panamaischen Angestellten belaufen sich auf 294,5 Mio. US-Dollar und der Einkauf von Waren und Dienstleistungen auf nicht ganz 400 Mio. US-Dollar. Insgesamt werden die kanalbedingten BIP-Multiplikatoren auf zwischen 1,27 und 1,37 geschätzt (Pagano, et al. 2012).

Infolge einer kurzfristigen Schließung des Kanals käme es zu einer Verringerung des Beitrags, der in die Staatskasse fließt. Dies ist auch eine politische Frage, eine genaue Vorhersage ist daher nicht möglich. Der Mindestbeitrag, den die ACP an die Regierung Panamas abführen muss, ist auf 568 Mio. US-Dollar pro Jahr festgesetzt. Die Berechnung einer anteiligen Quote auf Grundlage der Zahlung im Jahr 2011 an das Finanzministerium als Referenzwert ergäbe einen Verlust von 2,87 Mio. US-Dollar pro Tag für den Fiskus. Löhne und sonstige indirekte Beiträge wären kurzfristig nicht betroffen.

Eine Einschränkung der Dienste und des Betriebs des Kanals für einen längeren Zeitraum würde den Beitrag des Kanals zur lokalen Wirtschaft betreffen. In diesem Fall würden die Verluste für den Fiskus bei anteiliger Verringerung basierend auf der Kanalnutzung vermutlich höher ausfallen. Im Fall einer für zehn Tage um 30 % reduzierten Nutzung des Kanals betrügen die Ausfälle etwa 8,6 Mio. US-Dollar. Generell würde ein Rückgang der Kanalnutzung um ein Prozent etwa 30.000 US-Dollar pro Tag kosten. In Bezug auf das Frachtaufkommen würde – auf Grundlage des Frachtgesamtaufkommens von 218 Millionen Tonnen, das 2012 durch den Kanal transportiert wurde – jede Tonne, die aufgrund Durchfahrtseinschränkungen verloren ginge, einen Verlust von 1,3 Cent pro Tonne pro Tag bedeuten.

In einem breiteren Kontext bietet die Studie von Pagano *et al.* genaue Schätzungen der Multiplikatoreffekte des Kanals für den maritimen Cluster in Panama sowie für die Volkswirtschaft Panamas. In dieser Hinsicht sind die zollfreie Zone wie auch der Hafensektor, gemeinsam mit dem Kanal, wichtige Antriebskräfte für die Wirtschaft Panamas. Während kurzfristige Störungen des Kanalbetriebs die Entwicklung des Clusters² vermutlich nicht hemmen würden, könnte langfristig die Wettbewerbsfähigkeit des Logistik-Clusters beeinträchtigt sein, wenn sich das Frachtaufkommen auf andere Lieferketten verlagert. Wie schwer sich solche langfristigen Änderungen auswirken würden, ist schwierig zu bewerten: Es hängt unter anderem von der Fähigkeit des Clusters ab, unabhängig von eventuellen Betriebseinschränkungen am Kanal für den Frachttransport interessant zu sein, wie auch vom Wachstum des Süd-Süd-Handels.

3.3 Globale Ebene

Es ist davon auszugehen, dass sich Störungen des Kanalbetriebs global auswirken würden. Insbesondere

² Es könnte sogar eine erhöhte Clusteraktivität zu verzeichnen sein, da es bei Betriebsstörungen des Kanals potenziell zu einem erhöhten Bedarf an Umladeaktivitäten, intermodalem Transport usw. kommen könnte.

wird durch das Erweiterungsprogramm die Durchfahrt von Post-Panamax-Schiffen durch den Kanal zu Zielhäfen im Osten der USA möglich sein. Der Kanal wird auch im Rahmen des Süd-Süd-Verkehrs genutzt, der Nordamerika und Nordeuropa mit Südamerika verbindet. Die Erweiterung des Kanals könnte das Wachstum des Handelsvolumens, das Panama passiert, begünstigen, allerdings hängt der wirtschaftliche Erfolg des Landes ganz wesentlich von der Wettbewerbsfähigkeit des Panamakanals gegenüber anderen Transportoptionen ab (Abb. 6).

Zu den wichtigsten Handelsverbindungen weltweit gehören die Routen zwischen der asiatisch-pazifischen Region und der amerikanischen Ostküste. Dabei wird etwas mehr als die Hälfte des Handelsvolumens über den intermodalen Transport durch Kanada, die Westküste der USA und Mexiko abgewickelt, während circa 45 % auf dem Seeweg, überwiegend durch den Panamakanal, transportiert werden (Rodrigue, 2010).

Es ist anzumerken, dass sich der Marktanteil der komplett auf dem Seewege verlaufenden Frachtroute durch den Panamakanal in die USA zu Lasten der alternativen intermodalen Landbrücke erhöht hat. Der Grund hierfür liegt in Kapazitätsengpässen in den Häfen der Westküste der USA und im Schienennetz (Fan, et al. 2009). Auch ist dieser Trend das Ergebnis einer Strategie der logistischen Diversifizierung, die Logistikdienstleister verfolgen (Rodrigue, 2010). Die gestiegene Containerfrachtkapazität, die mit dem exponentiellen Wachstum der Post-Panamax-Flotte einhergeht, ist in hohem Maße ausschlaggebend für das Erweiterungsprojekt des Kanals. Es ist davon auszugehen, dass der Containerverkehr weiterhin Hauptnutznieser der Kanalerweiterung sein wird, da Tanker aufgrund ihrer Größe auch den verbreiterten Kanal nicht werden nutzen können (Komiss & Huntzinger, 2011).

Die wichtigste Konkurrenz zum Panamakanal im internationalen Frachtverkehr zwischen Asien und der Ostküste der USA ist die sogenannte *US-Landbrücke*. Die Fracht in den Häfen der Westküste, Los Angeles/Long Beach, Oakland, Portland und Seattle/Tacoma, wird auf Güterzüge oder LKW verladen und zu den zentralen Vertriebsdrehkreuzen in Chicago, Memphis und St Louis transportiert. Zwar ist die Route durch den Panamakanal in der Regel kostengünstiger als die Landbrücke, in Bezug auf die Fahrzeiten ist der Kanal jedoch weniger konkurrenzfähig, denn dieser Weg nimmt im Durchschnitt drei bis fünf Tage länger in Anspruch (Corbett et al., 2012; Fan, et al. 2009).

Es ist zu beachten, dass die Wettbewerbsfähigkeit einer Logistikroute von drei Kernkriterien abhängt: Kosten, Fahrzeit und Zuverlässigkeit (Rodrigue, 2010). Während Kosten und Fahrzeit durch empirische oder Simulationsmodelle mit einem relativ hohen Maß an Genauigkeit vorhersagbar sind (z. B. Fan, et al. 2009; Tavasszy, et al. 2011), lässt sich die Zuverlässigkeit eines Korridors schwieriger abschätzen, da hier Variablen hineinspielen, die sich nur wenig präzise vorhersagen lassen, zum Beispiel politische Ereignisse (Krieg, Streik usw.), Unfälle oder Wetterbedingungen. Üblicherweise wird daher so verfahren, dass das Netzwerk der Lieferketten ausreichend robust gestaltet wird, indem zum Beispiel Lager oder diverse Routen/Transportmittel vorgesehen werden, um auf diese Weise auf plötzlich auftretende Veränderungen im

Panama-Kanal

Anpassung an den Klimawandel im Panamakanal

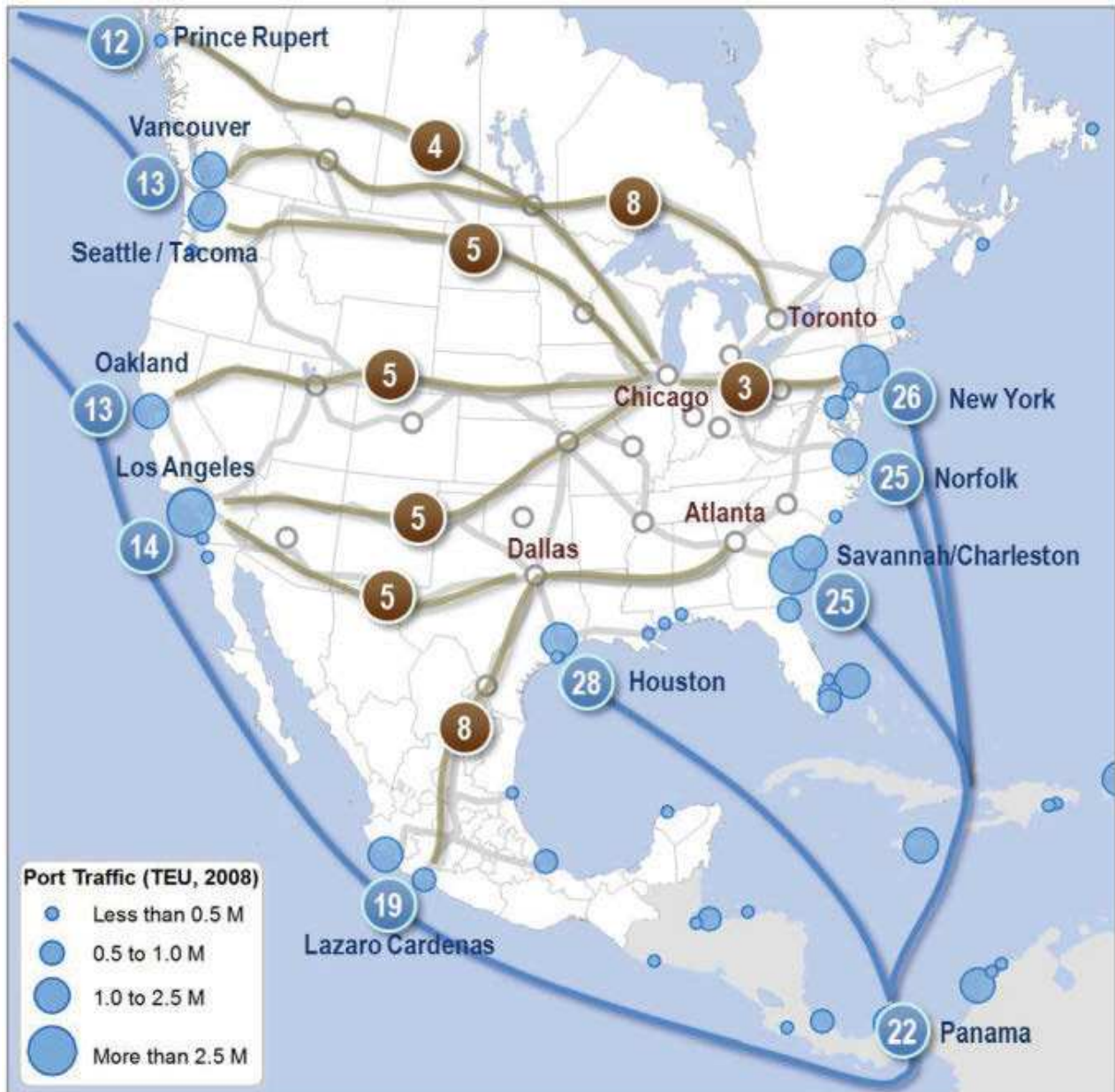


Abbildung 6: Standard-Fahrzeiten auf den möglichen Routen zwischen Shanghai und Nordamerika (in Tagen)

Quelle: Rodrigue, 2010.

Netzwerk aufgrund von Störungen in der Lieferkette reagieren zu können (Lam, 2012).

Es gibt keine Studien, die sich speziell mit den Auswirkungen von Betriebsstörungen im Panamakanal für den internationalen Handel beschäftigen, abgesehen von der Forschung im Rahmen der Torrijos-Carter-Abkommen von 1977, die sich jedoch eher auf politische als auf klimatische Risiken konzentrieren (Elton, 1987; Randolph, 1988). Zwar existieren Studien zur Wettbewerbsfähigkeit des Kanals, insbesondere im Zusammenhang mit der aktuellen Erweiterung (z. B. Costa, et al. 2012; Fan, et al. 2009; Mitchell, 2011; Pagano, et al. 2012), die Ergebnisse dieser Studien lassen sich jedoch nur teilweise für unsere Zwecke verwenden.

Eine aktuelle Studie, siehe Ungo und Sabonge 2012, befasst sich mit der Wettbewerbsfähigkeit der Kanal-Routen gegenüber anderen internationalen Routen. Sie liefert Hinweise darauf, inwieweit der internationale Welthandel vom Panamakanal abhängig ist. Auch wenn eine genaue Kostenschätzung des Nutzens des Kanals auf globaler Ebene nicht möglich ist, so lässt sich doch bewerten, welche Kostensenkungen für den Handel der Kanal bieten kann (Abb. 7). Hierbei handelt es sich ganz eindeutig um kurzfristige Effekte, die ggf. nicht ursächlich für die Kostenschwankungen im internationalen Seeverkehr aufgrund eines unausgewogenen Verhältnisses zwischen Angebot und Nachfrage sind.

Panama-Kanal

Anpassung an den Klimawandel im Panamakanal

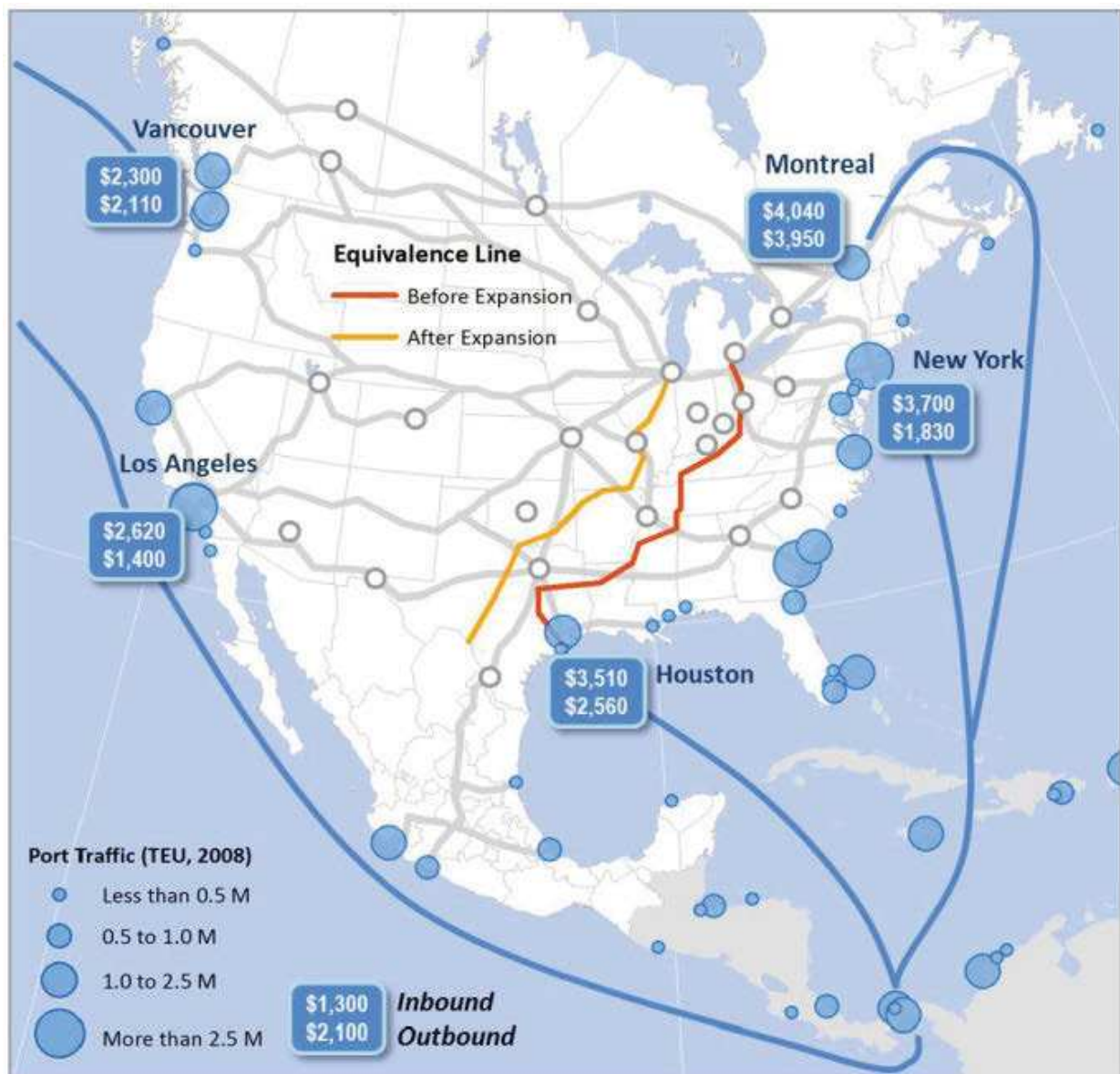


Abbildung 7: Seetransportkosten in US-Dollar für einen 40-Fuß-Container aus Shanghai, ausgewählte Hafenpaare, Mitte 2010.

Quelle: Rodrigue 2010.

Die Bedeutung des Kanals für die Container-Schifffahrt zeigt sich durch die Tatsache, dass das Container-Segment, gemessen an den Einnahmen, das größte Marktsegment des Panamakanals darstellt. Containerschiffe machten im Steuerjahr 2010 52 % der Gesamt-Gebühreneinnahmen und 24 % des Seeverkehrs durch den Kanal aus. Zwischen 1997 und 2007 stieg die Anzahl der Schiffe, die den Kanal durchfahren, stetig an, insbesondere infolge der Erweiterung des Linienverkehrs in der Seeschifffahrt zwischen Asien und der Ostküste der USA. Dieses Wachstum wurde durch die Rezession des Jahres 2008 zum Erliegen gebracht. Die Anzahl der Linienverbindungen durch den Kanal sank von 43 in 2007 auf 33 Ende 2010, Ungo und Sabonge (2012). Ursächlich für die rückläufige Nutzung des Kanals sind der Rückgang bei der Frachtnachfrage aus den USA und der dramatische Anstieg verfügbarer Kapazitäten, auch aufgrund der exponentiell gewach-

senen Flotte. Hohe Kapazitätsüberschüsse sind ein Anreiz für Frachtunternehmen, längere Routen zu fahren. Dadurch versuchen sie, die Gesamtkapazität zu reduzieren.

Ein kritischer Faktor für die Bewertung der Wettbewerbsfähigkeit des Kanals, und letzten Endes seiner Attraktivität, ist die Höhe der Gebühren, die in Kombination mit dem Kraftstoff die bestimmende Größe darstellt (siehe Tabelle 1 für einen Vergleich der alternativen Routen). Es sollte jedoch erwähnt werden, dass letztendlich die internationale Nachfrage ausschlaggebend dafür ist, wie intensiv der Kanal genutzt wird, ebenso wie die Verfügbarkeit von Transportalternativen bei Nachfrageschwankungen. Die Nachfrage im Bereich des maritimen Frachtverkehrs ist eine abgeleitete Nachfrage und reagiert daher relativ unelastisch auf Preiserhöhungen.

Panama-Kanal
Anpassung an den Klimawandel im Panamakanal

Route	Kosten pro TEU			Wettbewerbsindex	Transportzeit (Tage)
	Auf See	Über Land	Gesamt		
Panamakanal	\$ 1123	\$ 357	\$ 1480	1,00	28,0
Kap Hoorn	\$ 1376	\$ 357	\$ 1733	1,17	41,0
Intermodal via USNWC	\$ 746	\$ 1253	\$ 1999	1,35	25,5
Intermodal via USSWC	\$ 755	\$ 1219	\$ 1974	1,33	25,0

Tabelle 1: Wettbewerbsindex für ausgewählte Routen (2009)

Quelle: Panama Canal Authority (ACP)

	Lokal (ACP)	Panama	Global
Vorübergehende Schließung des Kanals (zwischen 1 Stunde und einigen Tagen)	Vorübergehende, aber erhebliche Einnahmeverluste	Begrenze Folgen, im Wesentlichen in Form von verringerten Einnahmen für die Staatskasse	Begrenzte Folgen, da globale Lieferketten vorübergehende Störungen abfangen können. Es könnte kurzzeitig zur Überlastung auf anderen Routen kommen.
Vorübergehende Einschränkung des Kanalbetriebs (zwischen einigen Tagen und wenigen Wochen)	Vorübergehende, aber erhebliche Einnahmeverluste	Begrenze Folgen, im Wesentlichen in Form von verringerten Einnahmen für die Staatskasse	Höhere Auswirkungen, da die vorhandenen Transportsysteme durch längere, deutliche Einschränkungen bei der Nutzung des Kanals unter Druck geraten würden.
Langfristige Einschränkung des Kanalbetriebs (mehrere Wochen bis über ein Jahr)	Erhebliche Einnahmeverluste. Die Nachfrage könnte sich auf andere Korridore verlagern.	Potenzieller Wettbewerbsverlust des Kanals	Es käme zu einer Veränderung der globalen Lieferkettenstrukturen.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Folgen von Störungen des Kanalbetriebs.

Ungo und Sabonge (2012) zeigen, dass der Wert der Routen durch den Panamakanal bei starken Märkten ansteigt und in schwachen Märkten sinkt. Daher bewegt sich die Position des Kanals im Wettbewerb entsprechend den Schwankungen der Wirtschafts- und Schifffahrtszyklen. Die Autoren stellen des Weiteren fest, dass der Wert der Route durch den Panamakanal mit den Kraftstoffpreisen korreliert. Mit steigenden Kraftstoffpreisen wird die Nutzung kürzerer Transportalternativen durch den Kanal attraktiver.

In Krisenzeiten ist der Kanal etwa 10 % kostengünstiger als alternative Routen und in Zeiten wachsender Märkte 20 % günstiger (Ungo und Sabonge, 2012). Es ist davon auszugehen, dass sich diese Prozentzahlen mit steigenden Kraftstoffpreisen weiter erhöhen. In Bezug auf intermodale Gebühren kann der Panamakanal Frachtunternehmen Einsparungen von über 30 % bieten (ACP, 2011).

3.4 Zusammenfassung der wirtschaftlichen Folgen bei Störungen des Kanalbetriebs

Die wirtschaftlichen Folgen von Betriebsstörungen im Panamakanal auf den verschiedenen geografischen Ebenen sind in der nachfolgenden Tabelle 2 zusammengefasst.

Eine wichtige Dimension, die in der vorstehenden Tabelle nicht abgebildet ist, stellen die Faktoren Zuverlässigkeit und Häufigkeit der Störungen dar. Eine gelegentliche Störung des Kanalbetriebs wirkt sich ggf. nicht langfristig auf die Wettbewerbsfähigkeit des Kanals aus. Kommt es jedoch häufiger vor oder sind diese Störungen unberechenbar, könnte die Attraktivität des Kanals als Alternative zur Landbrücke durch die USA darunter leiden.

4. Schlussfolgerungen

Die vorliegende Abhandlung sollte einen Überblick über die Folgen des Klimawandels für das komplexe System des Panamakanals geben, mit einem besonderen Schwerpunkt auf den im Zusammenhang mit Störungen

des Kanalbetriebs entstehenden Kosten. Der Kanal ist für klimabedingte Störungen in einem erheblichen Maße anfällig. In weiteren Studien sollten die Risiken und mit dem Klimawandel verbundenen Kosten quantifiziert werden. Das größte, durch den Klimawandel bedingte Risiko scheinen Dürreereignisse zu sein. Anhaltende Dürren in der Trockenzeit könnten den Wasserpegel im Gatún-See derart absinken lassen, dass die ACP den Tiefgang der Schiffe beschränken müsste oder sogar Störungen des Kanalbetriebs die Folge wären. Im Erweiterungsprogramm ist das Thema der Wasserknappheit bereits berücksichtigt. Ein Programm zur umfassenden Wiederaufforstung läuft derzeit. Während im Hinblick auf den Umweltnutzen durch ein besseres Management von Wassereinzugsgebieten ein Konsens zu bestehen scheint, fanden andere potenzielle klimawandelbedingte Gefahren bisher wenig Aufmerksamkeit.

Folgende Aspekte sollten eingehender untersucht werden:

- Auswirkung von Ernteaussfällen und Veränderungen der Handelsströme für landwirtschaftliche Erzeugnisse auf die Kanal-Einnahmen,
- Auswirkung bestimmter Witterungsbedingungen auf die Befahrbarkeit des Kanals (z. B. Nebel, Starkregen) sowie die Bewertung des Risikos von Erdbeben
- Auswirkung des Klimawandels auf die Häfen und Logistikzentren rund um den Kanal
- Auswirkung von politischen Unruhen, Hunger und Bevölkerungsbewegungen in Panama.

Das Potenzial für klimawandelbedingte Störungen verlangt weitere Untersuchungen zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen am Kanalsystem.

Danksagung

Auch wenn der Inhalt dieser Abhandlung das Ergebnis der Forschungsarbeit des Autors aus dem Jahr 2013 ist, gehen einige Ideen auf Gespräche aus der Zeit der Anstellung des Autors bei DNV-GL von 2010 bis 2012 und seiner Beteiligung am ADAPT-Projekt zurück. Der Verfasser dankt Luca Garré, Peter Friis Hansen und Elzbieta Bitner-Gregersen für ihre Beiträge im Rahmen dieser Gespräche. Es gelten die üblichen Haftungsausschlüsse.

Literatur

ACP and Nathan Associates, (2011). *Re-estimation of Economic Impacts of Canal Related Activities, Programa De Dimensión del Impacto del Canal de Panamá Sobre la Economía del País, Panama City, Panama* (Miami, FL: Autoridad del Canal de Panamá (ACP)).

ACP, Intracorp and Asesores Estratégicos, (2006). *Impacto Económico del Canal de Panamá en El Ámbito Nacional*. ACP, Panama City, Panama (Miami, FL: Autoridad del Canal de Panamá (ACP)).

ACP (2007). *Estudio de Impacto Ambiental Categoría III Proyecto de Ampliación del Canal Tercer Juego de*

Esclusas. ACP, Panama City, Panama (Miami, FL: Autoridad del Canal de Panamá (ACP)).

Berman, G. (1995). Landslides on the Panama Canal. In *Energy and Mineral Potential of the Central American-Caribbean Region* (S. 391-395). Springer Berlin Heidelberg.

Brandes, E. M., (1967). *Analysis of Panama Canal Traffic and Revenue Potential*, Prepared for Panama Canal Company (Menlo Park, CA: Stanford Research Institute)

Carse, A. (2012). Nature as infrastructure: Making and managing the Panama Canal watershed. *Social Studies of Science*, 42(4), 539-563.

CEPAL, (1965). *Estudio Sobre las Perspectivas del Actual Canal de Panamá*, Spanische Fassung (Santiago, Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe)

CEPAL, (1966). *La Economía de Panamá y la Construcción de un Canal Interoceánico a Nivel del Mar*, Spanische Fassung (Santiago, Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe)

Cheng, F. Y., & Georgakakos, K. P. (2011). Statistical analysis of observed and simulated hourly surface wind in the vicinity of the Panama Canal. *International Journal of Climatology*, 31(5), 770-782.

Corbett, J. J., Deans, E., Silberman, J., Morehouse, E., Craft, E., & Norsworthy, M. (2012). Panama Canal expansion: emission changes from possible US west coast modal shift. *Carbon Management*, 3(6), 569-588.

Costa, R., Rosson, C., Robinson, J., & Fuller, S. (2012). The Impacts of the Panama Canal Expansion on World Cotton Trade. *53rd Annual Transportation Research Forum, Tampa, Florida, March, 15th – 17th, 2012*.

De Marucci, S. (2002). Impact of el Niño Southern Oscillation Phenomenon on the Panama Canal and its Markets. International Association of Maritime Economists Annual Conference, 13-15 November, 2002, Panama.

DNV GL (2014). *Adaptation to a changing climate*, Høvik.

Duncan, J. M. (2010). Managing Unstoppable Landslides in the Panama Canal. *Geo-Strata—Geo Institute of ASCE*, 14(6), 12-13.

ECLAC (2012). *Preliminary Overview of the Economies of Latin America, 2012* (Santiago, Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe).

Elton, C. (1987). Studies of alternatives to the Panama Canal. *Maritime Policy and Management*, 14(4), 289-299.

Fan, L., Wilson, W. W., & Tolliver, D. (2009). Logistical rivalries and port competition for container flows to US markets: Impacts of changes in Canada's logistics system and expansion of the Panama Canal. *Maritime Economics & Logistics*, 11(4), 327-357.

Foster, W., Valdés, A., Davis, B., & Anriquez, G. (2011). The constraints to escaping rural poverty: an analysis of the complementarities of assets in develop-

- ing countries. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 33(4), 528-565.
- Komiss, W., & Huntzinger, L. (2011). The Economic Implications of Disruptions to Maritime Oil Chokepoints. *Center for Naval Analysis*.
- Lam, J. S. L. (2012). Risk Management in Maritime Logistics and Supply Chains. *Maritime Logistics: Contemporary Issues*, 117.
- Mitchell, C. (2011). *Impact of the expansion of the Panama Canal: an engineering analysis* University of Delaware.
- Nathan Associates, Inc. (2003). *Transportation Study on the Dry Bulk Market Segment and the Panama Canal*, Volume I, Draft Final Report (Arlington, VA: Nathan Associates Inc)
- Ogden, F. L., & Stallard, R. F. (2013). Land use effects on ecosystem service provisioning in tropical watersheds, still an important unsolved problem. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(52), E5037-E5037.
- Pagano, A. M., Light, M. K., Sánchez, O. V., Ungo, R., & Tapiero, E. (2012). Impact of the Panama Canal expansion on the Panamanian economy. *Maritime Policy & Management*, 39(7), 705-722.
- Panama Canal Authority (ACP). (2012). *Annual Report 2012*. Miami, FL.: Autoridad del Canal de Panamá (ACP).
- Randolph, F. F. (1988). The strategic value of the Panama Canal: value versus cost. DTIC Document).
- Rodrigue, J. (2010). *Factors impacting North American freight distribution in view of the panama Canal expansion* Van Horne Institute.
- Shamir, E., Georgakakos, K. P., & Murphy Jr, M. J. (2013). Frequency analysis of the 7–8 December 2010 extreme precipitation in the Panama Canal watershed. *Journal of Hydrology*, 480, 136-148.
- Simonit, S., & Perrings, C. (2013a). Bundling ecosystem services in the Panama Canal watershed. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(23), 9326-9331.
- Simonit, S., & Perrings, C. (2013b). Reply to Ogden and Stallard: Phenomenological runoff models in the Panama Canal watershed. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(52), E5038-E5038.
- Stallard, R. F., & Kinner, D. A. (2005). Estimation of landslide importance in hillslope erosion within the Panama Canal watershed. In *The Río Chagres, Panama* (S. 281-295). Springer Netherlands.
- Stanford Research Institute (1967). *Revised General Scope and Approach of Stanford Research Institute Study of the Economic Implications of Various Sea-level Canals on Panama and Colombia* (Menlo Park, CA: Stanford Research Institute)
- Tavasszy, L., Minderhoud, M., Perrin, J., & Notteboom, T. (2011). A strategic network choice model for global container flows: specification, estimation and application. *Journal of Transport Geography*, 19(6), 1163-1172.
- Ungo, R. & Sabonge, R. (2012). 'A competitive analysis of Panama Canal routes', *Maritime Policy & Management*, Vol. 39, Iss. 6, S. 555-570.
- Vereinte Nationen, Wirtschafts- und Sozialrat, (1979), *Panamá: Consideraciones Para la Formulación de un Programa de Desarrollo de la Subregión Canalera*, Documento de Trabajo (New York: United Nations, Economic and Social Council)
- Weltbank, (2007). *Country Partnership Strategy for the Republic of Panama* (Weltbank, Washington, DC).
- Weltbank, (2011). *Vulnerability, Risk Reduction, and Adaptation to Climate Change: Panama*, (Weltbank, Washington, DC).
- Weltbank, (2013). *Panama: Climate Baseline*, (Weltbank, Washington, DC).

Verfasser

Prof. Dr. Michele Acciario
Kuehne Logistics University
Großer Grasbrook 17
20457 Hamburg
Tel: 040/328707-281
E-Mail: michele.acciario@the-klu.org

Bemessung von Wasserbauwerken im Binnenbereich nach dem Teilsicherheitskonzept (PIANC WG 140)

Dipl.-Ing. Claus Kunz

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Zusammenfassung

Die PIANC Arbeitsgruppe 140 untersuchte das semi-probabilistische Bemessungskonzept für Wasserbauwerke im Binnenbereich in Europa, USA und China und deren Grundlagen. Einige Ergebnisse der Arbeit der PIANC Arbeitsgruppe 140 "Semi Probabilistic Design of Hydraulic Inland Structures" werden vorgestellt. Unterschiede der Konzepte werden dargestellt und analysiert. Nur wenige Länder haben spezielle zusätzliche Regelungen für Wasserbauwerke, obwohl die Basisnormen bevorzugt für Hochbauten entwickelt wurden. Mit einem Fragebogen wurden typische Elemente des semi-probabilistischen Bemessungskonzepts bezüglich der Grenzzustände von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit abgefragt. Dieses beinhaltete die Bestimmung der charakteristischen Last- oder Widerstandswerte, die typische Einwirkungen für den Wasserbau, Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Widerstände, Modell-Faktoren, Kombinationsbeiwerte, Konfigurationen der Grenzzustandsfunktionen, die Existenz und die Anzahl von Versagensfolge-Klassen, Zielsicherheiten und Robustheitskriterien. Abfrage-Ergebnisse wurden bestmöglichst verglichen und bewertet.

1. Einführung

Die PIANC Arbeitsgruppe 140 hat ihre Arbeit Mitte des Jahres 2010 aufgenommen, um das Thema der semi-probabilistischen Bemessungskonzepte für Wasserbauwerke zu bearbeiten.

Ingenieure nutzen die semi-probabilistische Methode für ihre Entwürfe von Wasserbauwerken, um die Zuverlässigkeit in ihrer Bemessung besser zu verstehen und zu verbessern. Aktuell existieren semi-probabilistische Bemessungs-Normen wie die amerikanische Last- und Widerstands-Faktor-Bemessung (LRFD) und verschiedene Bemessungs-Eurocodes, die frühere deterministische Ansätze ersetzen.

Die Vorteile dieser Umstellung sind effizientere Bemessungen, die der Zuverlässigkeit beim Entwurf von Wasserbauwerken besser Rechnung tragen. Diese Entwürfe sollten einheitliche Zuverlässigkeit haben mit einer besseren Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit, da die bekannten Unsicherheiten bei Bemessung und Konstruktion besser definiert sind.

Frühere deterministische Ansätze wurden durch semi-probabilistische Ansätze ersetzt (wie z.B. durch Eurocodes, LRFD, ...), wobei Teilsicherheitsfaktoren mit Lasten (Erhöhungsfaktoren) und mit Widerständen (Reduktionsfaktoren) multipliziert werden. Der Hintergrund des semi-probabilistischen Ansatzes ist, dass sich jede Realisierung einer Last oder auch einer Festigkeit stochastisch verhält. Diese Teilsicherheitsfaktoren werden zunächst nach Erfahrungswissen (Nachkalibrierung) und mehr und mehr nach den Ergebnis-

sen von Wahrscheinlichkeitsmodellen festgelegt, um die Unsicherheiten bei Lasten und Widerständen darzustellen, wobei die unterschiedlich zu betrachtenden Grenzzustände (Leistungsanforderung des Tragwerks), die Art der Einwirkung und untersuchte Versagensarten unterschieden werden.

Mitglieder der PIANC Arbeitsgruppe 140 sind die USA, die Niederlande, Belgien, Frankreich und Deutschland sowie korrespondierende Mitglieder aus Großbritannien und China. Die Untersuchung wurde mit einem Fragebogen begonnen, Literatur-Recherchen und Diskussionen schlossen sich an. Einige Ergebnisse werden in diesem Papier beschrieben. Der Bericht der PIANC WG 140 befindet sich in seiner endgültigen Entwurfsfassung, PIANC WG140 (2014), leichte Modifikationen der beschriebenen Ergebnisse sind noch möglich.

2. Semi-probabilistische Bemessungsmethode

2.1 Geschichte und Grundlagen

Während in früheren Bemessungskonzepten ein einzelner (globaler) Sicherheitsfaktor verwendet wurde, in den meisten Fällen wurde die Festigkeit der Widerstandsseite bzw. des Materials als Teil des Widerstands reduziert (oft als Verfahren der zulässigen Spannung bezeichnet), betrachtet das semi-probabilistische Bemessungsverfahren die Unsicherheiten einerseits auf der Einwirkungsseite und andererseits auf der Widerstandsseite. Hierfür wurde eine Menge von Wahrscheinlichkeitsmodellen entwickelt, abgeleitet und angewendet. Dabei wurden zwei unterschiedliche Sicherheitsfaktor-Kategorien (für Einwirkung und Widerstand) mit verschiedenen Faktoren hergeleitet, welche wiederum in verschiedene Sicherheitsfaktor-Komponenten aufgeteilt werden können. Beispielsweise wird gemäß Eurocode die Unsicherheit der Einwirkung in die Unsicherheit der Einwirkung selbst und in die Unsicherheit des Modells der Einwirkung und in ihre Beanspruchung unterschieden.

Alle Einwirkungen, die während der Nutzungsdauer eines Tragwerks auftreten können, werden nach Einwirkungen unterschieden, die jeweils gleichzeitig auftreten können und demzufolge in Bemessungs-Situationen (der früher nicht ganz kongruente Begriff war „Lastfall“) behandelt werden. Innerhalb der Bemessungssituationen werden relevante Grenzzustandsfunktionen, z. B. für Biegung mit Längskraft, z. B. für Querkraft, z. B. für Ermüdung, formuliert. Mehrere Bemessungs-Situationen sind möglich. In diesen Bemessungssituationen werden die charakteristischen Einwirkungen durch Teilsicherheits- und manchmal auch durch Kombinationsfaktoren gewichtet.

Die Grenzzustandsfunktion muss dahingehend gelöst werden, indem die Beanspruchung in jeder Bemessungssituation kleiner als das Widerstandsvermögen sein muss. Im semi-probabilistischen Bemessungskonzept werden stochastische Einflüsse in einer vereinfachten Art und Weise behandelt. Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen werden nicht direkt geführt, sie sind vielmehr durch die Bestimmung der charakteristischen Werte für Einwirkungen und Widerstände, durch die Bemessungs-Situationen und durch definierte Teilsicherheitsfaktoren repräsentiert. Die Methode der Teilsicherheitsbeiwerte (semi-probabilistisches Bemessungsmethode)

sungsverfahren) ist ein erster Schritt aus dem ehemaligen deterministischen Verfahren (historische oder empirische Bemessung) hin zu einem probabilistischen Verfahren, wobei die ehemaligen deterministischen (globalen) Sicherheitsfaktoren für Einwirkung und Widerstand in Einwirkungs- und Widerstandsfaktoren aufgetrennt und kalibriert wurden, vereinzelt auch durch probabilistische Methoden. Dieser Vorgang wird innerhalb von drei unterschiedlichen Stufen als Stufe I bezeichnet (Abb. 1).

Dadurch werden Unsicherheiten sowohl auf der Einwirkungsseite als auch auf der Widerstandsseite getrennt, um ein bauartübergreifendes Sicherheitskonzept, also für alle Arten von Tragwerken, als Ziel zu ermöglichen.

In verschiedenen Teilen der Welt wurden semi-probabilistische Bemessungsverfahren entwickelt und übernommen. Für die europäischen Länder wurde einstmals das Eurocode-Programm mit einem semi-probabilistischen Bemessungsverfahren beschlossen, um eine Harmonisierung für Produkte und für den Entwurf zu fördern. Im Jahr 1975 hat sich die Kommission der Europäischen Gemeinschaft zu einem Aktionsprogramm im Bereich der Baukonstruktionen entschlossen, das sich auf Artikel 95 des EG-Vertrags, siehe EN 1990 (2002), beruft. Die erste Eurocode-Generation war in den 1990er Jahren entstanden und wurde von der heutigen Generation ab etwa dem Jahr 2000 abgelöst. Eurocodes sind vor allem auf Hoch- und Ingenieurbauten sowie Brücken konzentriert. Eurocodes umfassen etwa 150 Hauptdokumente und geben einen Rahmen, in dem einige Anforderungen für weitere nationale Anpassungen geöffnet sind. Dadurch vermag jedes europäische Land eigene nationale Anhänge (kurz: NA) haben, in denen die zulässigen nationalen Ansätze dokumentiert werden. Hieraus wird die Anwendung des EUROCODE selbst und des zugehörigen NA zwingend erforderlich (z.B. DIN EN 1990 + DIN EN 1990/NA). Einige europäische Länder, wie z.B. Deutschland, haben individuelle Normen für Wasserbauwerke entwickelt, die vereinzelt auf den EUROCODEs basieren.

USA und das für den Verkehrswasserbau verantwortliche Corps of Engineers (USACE) begannen 1981 mit einer Bemessung mit Sicherheitsfaktoren und in Grenzzuständen (LRFD = Load Resistance and Factor Design), um Schritt mit industriellen Entwicklungen, Universitäten und anderen technischen Organisationen zu halten. Die überarbeiteten Sicherheitsfaktoren wurden so bestimmt, dass das Bemessungs-Ergebnis konservativ in etwa mit der früheren Methode nach zulässigen Spannungen übereinstimmte. Gegenwärtig sind in den USA verschiedene LRFD-Konzepte bekannt, die entweder im Hochbau, im Brückenbau oder im Wasserbau verwendet werden. Spezielle Regelungen für Wasserbauwerke unterschieden sich von denen im regulären Hochbau, repräsentiert durch ACI 318, "Bauvorschriften und Kommentar für Stahlbeton", um Anforderungen an die Nutzung und Gebrauchstauglichkeit von Wasserbauwerken zu stellen.

Die Bemessung von Hafengebäuden in China ist dem EUROCODE-Bemessungskonzept sehr ähnlich.

2.2 Überblick über Zuverlässigkeitsmethoden und – Ziele

Für das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte werden die Basisvariablen (z.B. Einwirkungen, Widerstände, geometrische Eigenschaften, etc.) durch Bemessungswerte beschrieben, die durch Multiplikation von charakteristischen Werten mit Teilsicherheitsbeiwerten γ und Kombinationswerten ψ für die relevanten Grenzzustände gebildet werden. Grundsätzlich können Zahlenwerte für Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte durch zwei Arten bestimmt werden:

- i) auf der Grundlage der Kalibrierung an auf lange Erfahrung beruhender Bautradition, was das vorherrschende Prinzip der ersten Generation der EUROCODES (deterministische Kalibrierung) gewesen war,
- ii) auf der Grundlage der statistischen Auswertung von Beobachtungen und experimentellen Daten, die im Rahmen der Zuverlässigkeitstheorie (probabilistisches Kalibrierungsverfahren) durchgeführt werden sollte.

Bei der Verwendung von Verfahren ii), entweder allein oder in Kombination mit Verfahren i), sollten die Teilsicherheitsfaktoren für den Grenzzustand der Tragfähigkeit und für verschiedene Einwirkungen und Widerstände derart kalibriert werden, dass die Zuverlässigkeitsniveaus für repräsentative Tragwerke so nah wie möglich an den Ziel-Zuverlässigkeitsindex β gemäß Tabelle 2 reichen.

Abb. 1 zeigt eine schematische Übersicht der verschiedenen Verfahren zur Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten für Bemessungsgleichungen (Grenzzustand) und die Beziehung zwischen diesen. Die probabilistischen Kalibrierungsverfahren für Teilsicherheitsfaktoren können in zwei Klassen unterteilt werden:

- vollständige probabilistische Methoden (Stufe III) und
- Zuverlässigkeitsmethoden Erster Ordnung (FORM) (Stufe II).

Voll probabilistische Methoden (Stufe III) geben die richtige Antwort auf das Zuverlässigkeit-Problem. Stufe III Methoden werden wegen des häufigen Mangels an statistischen Daten noch selten in der Kalibrierung von Bemessungsnormen verwendet. Allerdings benutzen Level-II-Verfahren bestimmte, genau definierte Näherungen und führen damit zu Ergebnissen, die für die meisten Tragwerks-Anwendungen als ausreichend betrachtet werden können.

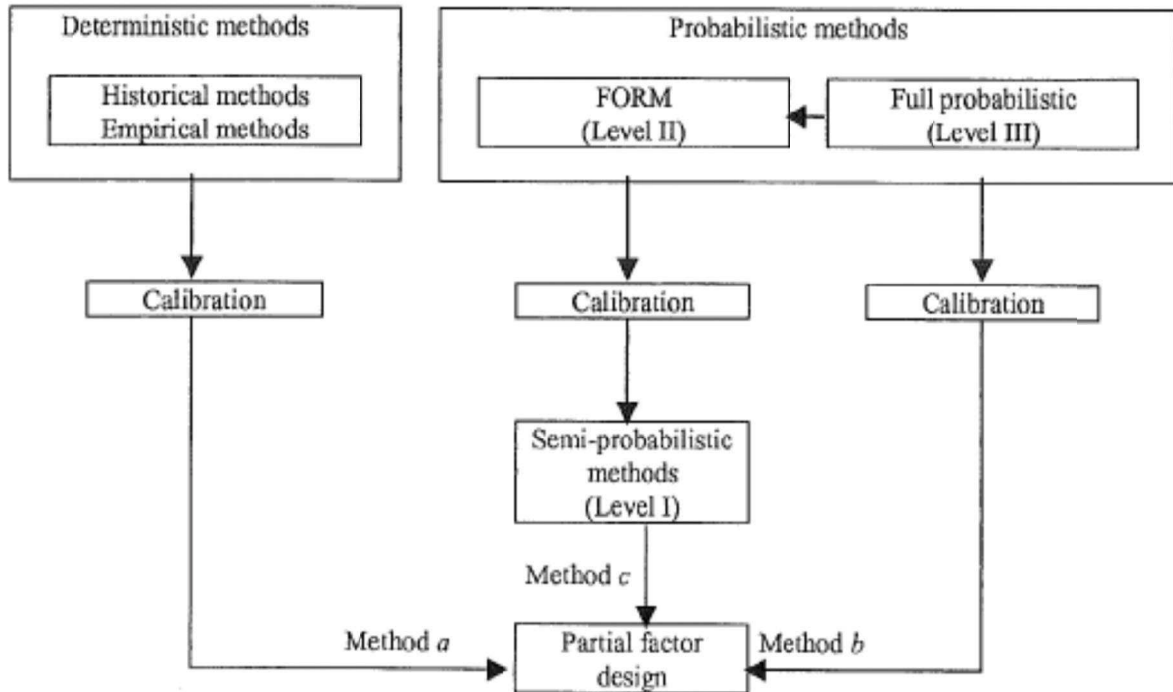


Abbildung 1: Übersicht der Zuverlässigkeitsmethoden, gem. EN 1990 (2002).

Das Maß der Zuverlässigkeit für die Stufen II- und III-Methoden sollte über die Überlebenswahrscheinlichkeit $p_s = (1 - p_f)$ bestimmt werden, wobei p_f die Versagenswahrscheinlichkeit in einem maßgebenden Bemessungs-Bereich für die betrachtete Versagensart und innerhalb eines angemessenen Referenzzeitraums (Nutzungsdauer) ist; p_f wird durch EN 1990 (2002) für einige typische Tragwerkstypen empfohlen.

Die Versagenswahrscheinlichkeit p_f und der entsprechende Zuverlässigkeitsindex β , siehe Tabelle 1, sind operative Werte für die Kalibrierung von Normen und dem Vergleich von Zuverlässigkeitsniveaus von Tragwerken. Sie müssen nicht unbedingt die tatsächliche Versagenswahrscheinlichkeit wiedergeben. EUROCODES und LRFD basieren in erster Linie auf Methode a), siehe Abbildung 1. Methode c) oder gleichwertige Verfahren wurden oder werden verwendet für die weitere Entwicklung der EUROCODES.

Für das Vorgehen in den Stufe II-Verfahren ist ein alternatives Maß der Zuverlässigkeit konventionell durch den Zuverlässigkeitsindex β definiert, der mit p_f zusammen hängt über:

$$p_f = \Phi(-\beta) \tag{1}$$

worin Φ die kumulative Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung ist. Die Beziehung zwischen β und p_f ist in Tabelle 1 aufgeführt. Als Vereinfachung wird eine Normalverteilung für Einwirkungen und Widerstände angenommen, so dass β als der Abstand von dem erwarteten Mittelwert der Grenzzustandsgleichung $Z = R - E$ in σ_z -Einheiten interpretiert werden kann; R repräsentiert die Verteilung des Widerstands und E die Verteilung der Einwirkungen, siehe Abbildung 2. Im Falle einer nicht-linearen Grenzzustandsgleichung $Z = g(R, E)$ - wie eigentlich bei allen praktischen Fällen - ist diese Interpretation nicht mehr streng gültig, wobei damit der Zuverlässigkeits-Index nicht mehr vernünftigen Quantilwerten der Wahrscheinlichkeitsfunktion entspricht.

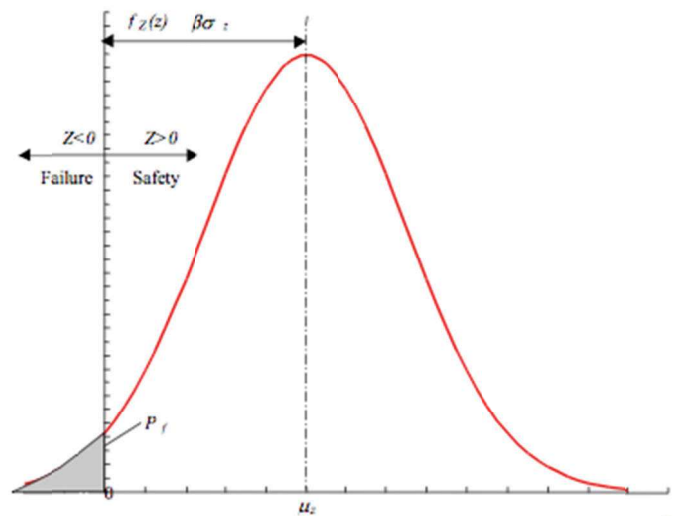


Abbildung 2: β als der Abstand von dem erwarteten Wert μ_z der Grenzzustandsfunktion Z, in σ_z -Einheiten.

Die Versagenswahrscheinlichkeit p_f kann für ein Tragwerk durch eine Leistungsfunktion g derart ausgedrückt werden, dass ein Überleben durch $g > 0$ und ein Versagen durch $g \leq 0$ ausgedrückt wird:

$$p_f = \text{Prob}(g \leq 0) \tag{2}$$

Wenn R der Widerstand und E die Auswirkung von Einwirkungen (z.B. Schnittgröße, Spannung) darstellen, gestaltet sich die Leistungsfunktion g :

$$g = R - E \tag{3}$$

wobei R, E und G Zufallsvariablen sind.

Wenn g normalverteilt ist, lässt sich der Zuverlässigkeitsindex β ausdrücken durch:

$$\beta = \mu_g / \sigma_g \tag{4}$$

wobei μ_g der Mittelwert von g und σ_g die Standardabweichung von g sind. Dann ergeben sich $\mu_g - \beta * \sigma_g = 0$ und für normalverteilte Sachverhalte $p_f = \text{Prob}(g \leq 0) = \text{Prob}(g \leq \mu_g - \beta * \sigma_g)$.

Für andere Verteilungen von g ist der Zuverlässigkeitsindex β nur ein abgeschätztes Maß für die Zuverlässigkeit.

Alle teilnehmenden (Mitglieds-)Länder kennen in ihrem Bemessungs-Konzept den Grenzzustand, für den im Allgemeinen die Bemessungs-Einwirkung den Bemessungswiderstand nicht überschreiten darf. EUROCODE gibt als grundlegende Gleichung im Allgemeinen $E_d \leq R_d$ an (für das statische Gleichgewicht gilt $E_{d,dst} \leq E_{d,stab}$), worin E_d der Bemessungswert für die Auswirkung der Einwirkung und R_d der Bemessungswert des entsprechenden Widerstands ist und gemäß EN 1990 (2002) geschrieben wird:

$$\sum_{i=1}^i \gamma_{F,i} * \psi_i * F_{k,i} \leq \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (5)$$

wobei:

- i = Anzahl der gleichzeitig berücksichtigten Einwirkungen,
- $\gamma_{F,i}$ = Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkung (günstig oder ungünstig),
- ψ_i = Kombinationsbeiwert für die Einwirkung,
- $F_{k,i}$ = charakteristischer Wert der Einwirkung,
- γ_M = Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand,
- R_k = charakteristischer Wert des Widerstandes.

Für das LRFD-Konzept betragen die Grundgleichungen gemäß AASHTO (2012), EM 1110-2-2104 (2003) und EM 1110-2 - 2105 (1994):

$$\sum_{i=1}^i \gamma_i Q_{ni} \leq \alpha \phi R_n \quad (6)$$

wobei:

- $\sum \gamma_i Q_{ni}$ = U = die Auswirkung der faktorisierten Einwirkungen
- γ_i = Lastfaktoren, die die Unsicherheit der Einwirkungen berücksichtigt
- Q_{ni} = Auswirkungen der Nenn-Lasten (normenspezifisch)
- α = Leistungsfaktor (nur für Stahlwasserbau)
- ϕ = Widerstandsfaktor aus ACI 318 (2011)
- R_n = Nennwert des Widerstands aus ACI 318 (2011).

Bei einem Vergleich der Gleichungen (5) und (6) ergibt sich zum einen, dass $(\gamma_{F,i} * \psi_i)$ in (5) dem γ_i in (6) entspricht, was bedeutet, dass der Teilsicherheitsfaktor für Einwirkungen im LRFD-Konzept auch die Kombination der Einwirkungen umfasst, siehe Ellingwood (1995), und zum anderen, dass $\gamma_m \approx (1 / \phi)$ beträgt.

Neben allen probabilistischen Definitionen und Ableitungen darf nicht vergessen werden, dass die resultierende Sicherheit nicht unwesentlich auch von weiteren Konstruktionsregeln oder Robustheits-Anforderungen abhängt, die in den verschiedenen Normen und Richtlinien aufgenommen wurden. Obwohl Europa und die USA ein Konzept mit Teilsicherheiten verwenden, sind beide Systeme nicht direkt vergleichbar, weshalb in Kapitel 3 die Konzepte nacheinander vorgestellt werden.

3. Untersuchung des semi-probabilistischen Bemessungskonzepts

3.1 Eurocode

Im EUROCODE wird zwischen Grenzzuständen der Tragfähigkeit (ULS) und der Gebrauchstauglichkeit (SLS) unterschieden, die beide sich auf Bemessungssituationen beziehen. Die Grenzzustände (ULS) betreffen:

- die Sicherheit von Personen und / oder
- die Sicherheit der Struktur

und werden für die Nachweisformate der Lagesicherheit (EQU), des Auftriebs (UPL), Strukturversagen (STR), Versagen des Bodens (GEO) und Ermüdungsbruch (FAT) betrachtet. Situationen vor dem eigentlichen Bauwerksversagen können - an Stelle des Versagens selbst - ebenfalls als Grenzzustände behandelt werden.

Die Grenzzustände (SLS) betreffen:

- das Funktionieren der Struktur oder Strukturelemente unter normalen Betriebsbedingungen
- den Benutzungskomfort der Menschen,
- das Aussehen der Bauwerks (große Durchbiegung, umfangreiche Rissbildung).

Hier wird zwischen reversiblen und irreversiblen Grenzzuständen unterschieden. Die Bemessung für Grenzzustände soll auf Tragwerks- und Lastmodellen beruhen, die praktisch und für die normale Ingenieursarbeit mit dem Teilsicherheitskonzept bewältigt wird, in einigen besonderen Fällen aber direkt mit probabilistischen Methoden. Es ist nachzuweisen, dass kein Grenzzustand überschritten wird, wenn relevante Bemessungswerte für Einwirkungen, Materialeigenschaften oder Produkteigenschaften sowie Geometriedaten in diesen Modellen verwendet werden. Die vorgenannten Bemessungssituationen werden in ständige, vorübergehende oder außergewöhnliche bzw. seismische Situationen eingestuft. Nachweise von Grenzzuständen, die zeitabhängige Effekte (z.B. Ermüdung) betrachten, sollten auf die Nutzungsdauer des Bauwerks bezogen werden. Verschiedene Grenzzustände werden mit den verschiedenen Kombinationen von Teilsicherheitsfaktoren verbunden.

Die relevanten Bemessungssituationen berücksichtigen die Umstände, unter denen das Tragwerk seine Funktion zu erfüllen hat:

- Ständige Bemessungssituationen, die sich auf die normalen Einsatzbedingungen beziehen,

- Vorübergehende Bemessungssituationen, die zeitlich begrenzte Bedingungen des Tragwerks berücksichtigen, z. B. während der Ausführung oder einer Reparatur,
- Außergewöhnliche Bemessungssituationen, die außergewöhnliche Bedingungen des Tragwerks oder seiner Einwirkungen berücksichtigen, z. B. Feuer, Explosionen, Anprall oder die Folgen von örtlichem Versagen,
- Erdbeben-Situationen als Bedingungen für das Tragwerk unter seismischen Einwirkungen, so dass alle Bedingungen berücksichtigt sind, die vernünftigerweise während der Ausführung und während der Nutzung des Tragwerks auftreten können.

Für eine spezielle Nachweisführung werden nunmehr Lastkombinationen ausgewählt, die zueinander kompatible Laststellungen, Verformungen und Imperfektionen enthalten, die gleichzeitig mit ständigen und veränderlichen Einwirkungen wirken. Tragwerks- und Lastmodelle können sowohl physikalische Modelle als auch mathematische Modelle sein. Einwirkungen sind durch ihre zeitliche Änderung wie folgt unterschieden:

- Ständige Einwirkungen (G), z. B. Eigengewicht von Tragwerksteilen, fester Ausrüstung und Straßenbelägen, aber auch indirekte Wirkungen infolge Schwinden/Kriechen und Setzungen;
- Veränderliche Einwirkungen (Q), z. B. Nutzlasten und Verkehrslasten auf Böden, Balken und Dächern, Wind- und Schneelasten;
- Außergewöhnliche Einwirkungen (A), z. B. Explosionen oder der Auswirkungen von Fahrzeuganprall.

Einwirkungen infolge Wasser können in Abhängigkeit vom Variationskoeffizient als ständige oder variable Einwirkung berücksichtigt werden.

Der charakteristische Wert einer Einwirkung wird als Mittelwert, als oberer oder unterer Wert oder als Nominalwert, letzterer bezieht sich mangels Erkenntnissen nicht auf eine bekannte statistische Verteilung, angegeben. EUROCODE gibt Informationen, wie man die charakteristischen Werte ermittelt, d.h. als Quantilwert und/oder als oberer oder unterer Wert.

Der Bemessungswert F_d einer Aktion F wird ausgedrückt durch

$$F_d = \gamma_{F,i} \cdot \psi_i \cdot F_{rep} \quad (7)$$

wobei F_k der charakteristische Wert der Einwirkung, γ_F der Teilsicherheitsfaktor und ψ_i der Kombinationsfaktor (wobei $\psi_i \leq 1$ gilt) sind.

Der Teilsicherheitsfaktor ist:

$$\gamma_{F,i} = \gamma_{Sd} \cdot \gamma_{f,i} \quad (8)$$

wobei:

γ_{Sd} der Teilsicherheits-Modell-Faktor zur Berücksichtigung von Last- und Beanspruchungsmodell ist,

$\gamma_{f,i}$ der Teilsicherheitsfaktor für die Unsicherheit der Einwirkung ist.

Teilsicherheitsfaktoren können auf die Einwirkung, als $\gamma_{f,i}$, oder auf die Auswirkung bzw. Beanspruchung, als $\gamma_{F,i}$, angewendet werden, EN 1990 (2002). Wenn zwischen günstigen und ungünstigen Auswirkungen der Maßnahmen zu unterscheiden ist, werden zwei verschiedene Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{F,inf}$ (in den meisten Fällen $\gamma_{F,inf} = 1,0$ für ständige Einwirkungen und $0,0$ für veränderliche Einwirkungen) und $\gamma_{F,sup}$ angesetzt. Für nicht-lineare Analysen (d.h., wenn die Beziehung zwischen Einwirkung und ihrer Wirkungen nicht mehr linear ist) sowie für den Fall einer einzig vorherrschenden Einwirkung gibt EN 1990 (2002) besondere Empfehlungen.

Die Eigenschaften von Materialien (Bauprodukte, aber auch Boden und Gestein) sollten auch durch charakteristische Werte beschrieben werden. Wenn der Nachweis des Grenzzustands empfindlich auf die Schwankungen der Materialeigenschaft reagiert, sollten obere und untere charakteristische Werte der Materialeigenschaft berücksichtigt werden. Wenn ein unterer Wert des Materials oder der Produkteigenschaft ungünstig ist, sollte der charakteristische Wert als 5% Quantilwert definiert werden, wenn ein hoher Wert von Material- oder Produkteigenschaft ungünstig ist, sollte der charakteristische Wert als 95% Quantilwert definiert werden. Materialeigenschaften werden aus standardisierten Tests unter festgelegten Bedingungen bestimmt.

Wenn statistische Daten nur unzureichend zur Verfügung stehen, um die charakteristischen Werte eines Materials oder Produkts zu ermitteln, können Nennwerte als charakteristische Werte oder gleich Bemessungswerte direkt festgelegt werden. Strukturelle Parameter, wie z. B. Elastizitätsmodul, Kriechzahl, thermischer Ausdehnungskoeffizient, etc. sollten durch einen Mittelwert dargestellt werden. Werte von Material- oder Produkteigenschaften sind in den spezifischen EURO-CODES, d.h. EN 1992 bis ggf. EN 1998 sowie in den einschlägigen harmonisierten europäischen technischen Spezifikationen oder anderen Dokumenten angegeben.

Geometrische Daten sind durch ihre charakteristischen Werte oder im Fall von Imperfektionen direkt durch Bemessungswerte angegeben. Die im Entwurf festgelegten Abmessungen können als charakteristische Werte angenommen werden. Wenn die statistische Verteilung ausreichend bekannt ist, können Werte von geometrischen Größen, die einem vorgeschriebenen Quantil der statistischen Verteilung entsprechen, verwendet werden.

Der Bemessungswert X_d eines Material- oder Produkteigenschaft wird in allgemeiner Form ausgedrückt durch:

$$X_d = X_k \cdot \eta / \gamma_m \quad (9)$$

und der Bemessungswert R_d für Strukturelemente :

$$R_d = (1 / \gamma_{Rd}) \cdot X_k \cdot (\eta / \gamma_m) \quad (10)$$

wobei:

X_k ist der Kennwert des Materials oder der Produkteigenschaft,

η ist der Mittelwert des Umrechnungsfaktors unter Berücksichtigung der Volumen- und Skaleneffekten, Wirkungen von Feuchtigkeit und Temperatur, und andere relevante Parameter

Sicherheit und Risikomanagement

Bemessung von Wasserbauwerken im Binnenbereich nach dem Teilsicherheitskonzept (PIANC WG 140)

γ_m ist der Teilsicherheitsfaktor für die Material- oder Produkteigenschaft, in dem die Unsicherheit bei der Festlegung der Material- oder Produkteigenschaft von ihrem charakteristischen Wert sowie die Unsicherheit des Umrechnungsfaktors η berücksichtigt sind;

γ_{Rd} ist der Teilsicherheitsfaktor für die Unsicherheit des Widerstandsmodells sowie von geometrischen Abweichungen, wenn diese nicht explizit modelliert wurden.

Die Kombination der Beanspruchungen von zu berücksichtigenden Einwirkungen sollte sich an dem Bemessungswert der Leit-Einwirkung $Q_{k,1}$ sowie der Kombination der Bemessungswerte von begleitenden veränderlichen Einwirkungen $Q_{k,i}$ orientieren. Die gebräuchlichste Kombinationsregel (für lineare Beziehung zwischen Einwirkungen und deren Auswirkungen) für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen lautet:

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} "+" \gamma_{Q,1} Q_{k,1} "+" \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \right\} \quad (11)$$

wobei:

"+" bedeutet "summiert werden (lineare Überlagerung) mit"

„Σ“ bedeutet "die kombinierte Wirkung von".

Das Format für die außergewöhnliche Bemessungssituation ist:

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} "+" A_d "+" \psi_{i,1} Q_{k,1} "+" \sum_{i \geq 2} \psi_{2,i} Q_{k,i} \right\} \quad (12)$$

wobei $\psi_{i,1}$ sich auf die maßgebende außergewöhnliche Bemessungssituation (Anprall, Feuer oder den Zustand nach einem außergewöhnlichen Ereignis) bezieht. Die Kombinationen von Einwirkungen für außergewöhnliche Bemessungssituationen sollten sich entweder auf eine spezielle außergewöhnliche Einwirkung A_d (Anprall, Feuer) oder auf eine Situation nach einer derartigen Ereignis (dann $A_d = 0$) beziehen. Für Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit gibt es analoge Bemessungssituationen.

Zielwerte für den Zuverlässigkeitsindex β sind für verschiedene Bemessungssituationen und für Zeiträume von 1 Jahr und 50 Jahren, abhängig von der beabsichtigten Nutzungsdauer des Tragwerks in EN 1990 (2002) definiert. Eine Nutzungsdauer von 100 Jahren, die in einigen Ländern die planmäßige Nutzungsdauer für Wasserbauwerke ist, vgl. DIN 19702 (2013), und einem β -Wert wie gemäß EN 1990 für 50 Jahre, bedeutet, dass die jährliche Zuverlässigkeit vergleichsweise höher ist. Eine weitere Abhängigkeit besteht zu den Zuverlässigkeitsklassen (oder Versagensfolgeklassen) nach EN 1990 (2002). Als Beispiel zeigt Tabelle 2 die Ziel-Zuverlässigkeiten für die Zuverlässigkeitsklasse RC 2 (mittlere Konsequenzen für Menschenleben und/oder die Wirtschaft und/oder die Umwelt), die für normale Gebäude und Ingenieurbauwerke verwendet wird, aber auch für Wasserbauwerke.

Die folgenden Tabellen zeigen einige Teilsicherheitsbeiwerte, die durch die Arbeitsgruppe PIANC WG 140 untersucht und für die Anwendung auf Wasserbauwerke in Europa zusammengestellt wurden.

Grenzzustand	Ziel-Zuverlässigkeit β	
	1 Jahreszeitraum	50 Jahreszeitraum
Tragfähigkeit (ULS)	4.7	3.8
Ermüdung		1.5 – 3.8 ¹⁾
Gebrauchstauglichkeit (irreversibel) (SLS)	2.9	1.5

¹⁾ von Inspektionsfähigkeit, Reparaturfreundlichkeit und Schadenstoleranz abhängig

Tabelle 2: Zielzuverlässigkeitsindex β für die RC-Klasse 2, gem. EN 1990 (2002)

Partial safety factors γ_F for actions „F“ (unfavourable / favourable)				
UPLIFT		DS-Persistent	DS-Transient	DS-Accidental
Permanent	D	1,05 / 0,95		1,0 / 0,95
	B	1,1 / 0,9		1,0 / 1,0
	F	1,0 / 0,9		1,0 / 1,0
	NL	1,0 / 0,9		1,0 / 1,0
Variable	D	1,5 / 0		1,0 / 1,0
	B	1,5 / 0		1,0 / 1,0
	F	1,5 / 0		1,0 / 1,0
	NL	1,5 / 0		1,0 / 1,0

Tabelle 3: Teilsicherheitsbeiwerte für Wasserbauwerke, Grenzzustand „Auftrieb“, gemäß EURO-CODE-Bemessung, für ständige und veränderliche Einwirkungen in ständigen, vorübergehenden und außergewöhnlichen Bemessungssituationen (DS), gem. PIANC WG140 (2014).

Partial safety factors γ_F for actions „F“ (unfavourable / favourable)				
STRUCTURAL		DS-Persistent	DS-Transient	DS-Accidental
Permanent	D	1,35 / 1,0	1,2 / 1,0	1,0 / 1,0
	B	1,35 / 1,0		1,0 / 1,0
	F	1,35 / 1,1		-
	NL	1,35 (1,2) / 0,9		1,0 / 1,0
	CN	1,2 / 1,0		-
Variable	D	1,5 / 0 (0,8) <small>for water</small>	1,3 / 0 (0,9) <small>for water</small>	1,0 / 0
	B	1,5 / 0		1,0 / 0
	F	1,5 / 0		1,0 / 0
	NL	1,5 / 0		1,0 / 0
	CN	1,4 - 1,5 / 0		-

Tabelle 4: Teilsicherheitsbeiwerte für Wasserbauwerke, Tragwerksversagen, gemäß EURO-CODE-Bemessung, für ständige und veränderliche Einwirkungen in ständigen, vorübergehenden und außergewöhnlichen Bemessungssituationen (DS), gem. PIANC WG140 (2014).

Partial safety factors γ_M for resistance „R“				
resistance		DS-Permanent	DS-Transient	DS-Accidental
Concrete	D	1,5		1,3
	B	1,5		1,5
	F	1,5		1,2
	NL	1,5		1,2
	CN	1,38		-
Reinforce- ment steel	D	1,15		1,0
	B	1,15		1,15
	F	1,15		1,0
	NL	1,15		1,0
	CN	1,1 – 1,2		-

Tabelle 5: Teilsicherheitsbeiwerte für Wasserbauwerke, Materialkennwerte für Stahlbeton, gemäß EUROCODE –Bemessung, für ständige und veränderliche Einwirkungen in ständigen, vorübergehenden und außergewöhnlichen Bemessungssituationen (DS), gem. PIANC WG140 (2014).

3.2 Load Resistance and Factor Design (LRFD) Konzept

In den USA stellt das „Load and Resistance Factor Design“ Konzept den rationalen Ansatz dar, mit dem die wesentlichen Unsicherheiten, d.h., Einwirkungen und Widerstände, quantitativ in den Bemessungsprozess integriert werden können. Ein Grenzzustand ist ein Zustand, bei dessen Überschreiten ein Tragwerk oder Tragwerksteil, wie z.B. eine Gründung oder ein aufgehendes Tragwerk, nicht mehr die Funktion erfüllt, für die sie ausgelegt wurde. Die Grenzzustände umfassen:

- Betriebs-Grenzzustand
- Tragfähigkeits-Grenzzustand
- Extremer Grenzzustand
- Ermüdungs-Grenzzustand.

Der Betriebs-Grenzzustand stellt das Leistungsvermögen des Tragwerks unter Betriebsbedingungen dar. Beispiele hierfür sind Setzungen oder Verformungen von Tragwerken. Der Tragfähigkeits-Grenzzustand beinhaltet das vollständige oder teilweise Versagen der Konstruktion. Beispiele für Tragfähigkeits-Grenzzustände sind z. B. Bauwerksversagen, Gleiten in der Gründungsfuge oder in der Geotechnik die Instabilität eines Hangs, AASHTO (2012). Stahlbetonbauwerke sollten in Übereinstimmung mit der aktuellen Norm ACI 318 (2011) möglichst nach dem LRFD Konzept bemessen werden.

Als Bemessungssituationen werden eine übliche, eine ungewöhnliche und eine extreme Bemessungssituation identifiziert. Die ungewöhnliche Bemessungssituation umfasst Einwirkungen wie Wind und Schnee, die extreme Bemessungssituation umfasst Erdbeben und Anprall.

Eine Kalibrierung der Last und Widerstandsfaktoren war erforderlich, um bei der Anwendung von LRFD die gewünschten Ergebnisse zu erzielen. Kalibrierverfahren umfassen in der Regel die Anwendung des technischen Ingenieurverständs, die Anpassung an das frühere, zum Teil noch angewendete „Zulässige Spannungsverfahren“ (Allowable-Stress-Design = ASD), Anwendung der Zuverlässigkeitstheorie sowie eine Kombination der genannten Ansätze.

Für das LRFD Konzept wurde bei der Bestimmung des Teilsicherheitsbeiwerts für den Widerstand ϕ eine Kombination der zuvor genannten Ansätze. In der Regel wurden die Teilsicherheitsbeiwerte für den Widerstand für Gründungen mit den Methoden der Zuverlässigkeitstheorie kalibriert, wenn ausreichend Mess- und Kennwerte verfügbar waren. Wenn keine oder nur unzureichende Daten zur Verfügung standen, um eine auf der Zuverlässigkeit basierte Kalibrierung durchzuführen, wurde in erster Linie mittels ASD-Methode und mit ingenieurmäßiger Beurteilung gearbeitet. Damit wurde allerdings das Hauptziel des LRFD-Konzepts, ein einheitliches Sicherheitsniveau bei der Bauwerksbemessung zu erreichen, nicht vollständig realisiert. Die Teilsicherheitsbeiwerte für den Widerstand in den LRFD Spezifikationen wurden über Vergleichs-Bemessungen überprüft, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse mit dem ASD-Konzept vergleichbar sind, AASHTO (2012).

Die Bemessungsnormen nach LRFD geben eine Versagenswahrscheinlichkeit oder eine Ziel-Zuverlässigkeit

β explizit nicht an, sondern nur die Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Widerstand. Diese Teilsicherheitsfaktoren sollen jedoch einem β -Zielwert zwischen 3 und 4 genügen, EM 1110-2-2104 (2003).

Einwirkungen werden als ständige Einwirkungen, Konstruktionslasten, Umwelt-Einwirkungen, hydraulische Lasten sowie Anpralllasten eingestuft, EM 1110-2-2106 (2008). Nennwerte wurden aus Statistiken abgeleitet und sind für Wasserbauwerke in USACE Engineering-Manuals angegeben, Ellingwood (1995).

Die Anforderungen innerhalb des LRFD Konzepts für die Bemessung wird durch eine Reihe von vorgegebenen Linear-Kombinationen mit faktorisierten Lasten dargestellt. Die Teilsicherheitsfaktoren sind für jede Lastkombination unterschiedlich und umfassen die Gleichzeitigkeit des Auftretens der darin enthaltenen Einwirkungen (Kombination). Das LRFD Konzept erlaubt eine Einzelfaktor-Methode (nur ein Teilsicherheitsbeiwert auf der Einwirkungsseite) oder eine Mehrfachfaktor-Methode (ggf. wird jeder Einwirkung ein eigener Teilsicherheitsbeiwert zugewiesen). In Abhängigkeit der Normen und von den Tragwerkstypen gibt es so eine bestimmte Anzahl von unterschiedlichen linearen Lastkombinationen. Modellunsicherheiten werden im LRFD Konzept ausdrücklich nicht betrachtet.

Das LRFD Konzept für Wasserbauwerke wird in Einzelfällen als Einzelfaktor-Methode oder durch die Mehrfachfaktor-Methode angewendet. Die Verwendung von einem einzigen Teilsicherheitsbeiwert für sowohl Eigen- als auch Verkehrslasten ist erlaubt. Darüber hinaus wird die Einzelfaktor-Methode erforderlich, wenn die Lasten auf das Tragwerk aus einer Boden-Bauwerks-Interaktion herrühren.

Alle Wasserbauwerke aus Stahlbeton müssen sowohl die Tragfähigkeits- als auch die Gebrauchstauglichkeitsanforderungen erfüllen. Beim Tragfähigkeitsnachweis wird dies durch die Multiplikation der charakteristischen (Gebrauchs-)Lasten mit entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten erreicht, für Wasserbauwerke zusätzlich durch Multiplikation mit einem zusätzlichen Hydraulik-Faktor H_f . Dieser hydraulische Faktor wird mit der gesamten Lastkombination multipliziert. Diese erhöhte Belastung dient der Sicherstellung der besonderen Tragfähigkeit wasserbaulicher Strukturen. Der Hydraulikfaktor ersetzt dabei auch die Durchführung von zusätzlichen Gebrauchstauglichkeitsnachweisen.

Teilsicherheitsbeiwerte gemäß ACI 318 (2011) dürfen bei Wasserbauwerken mit zwei Änderungen angewendet werden. Der Teilsicherheitsbeiwert für den seitlichen Flüssigkeitsdruck sollte mit 1,7 statt mit dem in ACI 318 vorgeschriebenen Wert von 1,4 berücksichtigt werden. Auch sollte für Wasserbauwerke, mit Ausnahme von zugbelasteten Bauteilen, die gesamte faktorisierte Bemessungslast U nach Ermittlung gemäß ACI 318 mit dem Hydraulikfaktor $H_f = 1,3$ erhöht werden. Für Zugglieder von Wasserbauwerken ist $H_f = 1,65$ anzusetzen.

Bei der Einzel-Lastfaktor-Methode werden sowohl die Eigen- als auch die Verkehrs-Lasten mit dem gleichen Teilsicherheitsbeiwert multipliziert:

$$U_h = H_f * [1,7 (D + L)] \quad (13)$$

wobei

U_h = faktorisierte Gesamt-Last für das Wasserbauwerk

H_f = hydraulischer Faktor

D = Eigenlast

L = Verkehrslast .

Eine Ausnahme von Gleichung (13) findet Anwendung, wenn die Auswirkungen von ungewöhnlichen oder extremen Belastungen wie Wind, Erdbeben oder andere Kräfte von kurzer Dauer und geringer Eintrittswahrscheinlichkeit einbezogen werden. Für diese Fälle sollten eine der folgenden Kombinationen für Wasserbauwerke verwendet werden:

$$U_h = H_f * (0,75 * U_{W \text{ oder } E}) \quad (14)$$

wobei

$U_{W \text{ oder } E}$ = nichthydraulische faktorisierte Last wie Wind oder Erdbeben

In der Mehrfach-Lastfaktor-Methode wird eine Lastkombination berechnet mit:

$$U_h = H_f * U = H_f * [1.4 D + 1.7 (L + F)] \quad (15)$$

wobei:

F = seitlichen Wasserdruck

Bei bestimmten Wasserbauwerken, wie Halbrahmen-Schleusen und Dükern, kann die Verkehrslast einen entlastenden („günstigen“) Effekt auf die Bemessungslast innerhalb der berücksichtigten Lastkombination haben. In diesem Fall ist eine weitere Lastkombination von Eigen- und Verkehrslasten mit einem angepassten Teilsicherheitsbeiwert für die variablen Lasten gemäß:

$$U_h = H_f * U = H_f * [1.4 D + 1.0 (L + F)] \quad (16)$$

zu untersuchen und im statischen Nachweis zu bewerten, EM 1110-2-2104 (2003).

Für Stahlwasserbauwerke bestehen typweise unterschiedliche Last-Kombinations-Gleichungen. Stemm-tore zum Beispiel sollten ihre Tragfähigkeit für die in den folgenden Lastkombinationen einkalkulierten Lasten erfüllen, EM 1110-2-2105 (1994):

$$U_h = 1,4 * H_s + 1,0 * I \quad (17a)$$

$$U_h = 1,4 * H_s + 1,0 * H_t \quad (17b)$$

$$U_h = 1,2 * 1,6 * D + (C + M) + 1,0 * H_t \quad (17c)$$

$$U_h = 1,2 * 1,6 * D + (C + M) + 1,0 * Q \quad (17d)$$

$$U_h = 1,2 * H_s + 1,0 * E \quad (17e)$$

Die Nennlasten sind wie folgt definiert:

D = Eigenlast

Q = maximale Betriebsgeräteleast

E = Erdbebenlast

I = Schiffsstoßlast

H_s = hydrostatischen Last

H_t = zeitliche hydraulischen Belastung

C = Eislast

M = Schlammbelastung.

Andere Arten von Schleusen und Wehrverschlüssen werden mit einer anderen Reihe von Lastkombinationen

nachgewiesen, in einigen Fällen mit der Methode zulässiger Spannungen (ASD) bis das LRFD Konzept auch hier flächendeckend entwickelt ist.

Teilsicherheitsfaktoren für Widerstände reichen normalerweise von $\Phi = 0,85$ für Druckglieder bis zu $\Phi = 0,90$ für Balken unter Momenten- und Querkraft-Beanspruchung sowie Zugglieder an der Streckgrenze. Befestigungen und Zugglieder im Bruchzustand werden mit $\Phi = 0,75$ bemessen.

Neben Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsanforderungen müssen viele Wasserbauwerke auch Stabilitätsanforderungen unter verschiedenen Last- und Gründungsverhältnissen gerecht werden. Die Stabilitätsanalyse von Wasserbauwerken müssen mit Gebrauchslasten nach EM 1110-2-2101, "Stabilitätsanalyse von Wasserbauwerken" durchgeführt werden. Die nicht-faktorisierten Lasten und die daraus resultierenden Beanspruchungen werden dann verwendet, um die nicht-faktorisierten Momente, Quer- und Längskräfte an kritischen Punkten der Struktur zu bestimmen. Die nicht-faktorisierten Schnittgrößen werden dann mit passenden Teilsicherheitsfaktoren und ggf. dem Hydraulikfaktor multipliziert, um die Tragfähigkeitsnachweise in den relevanten Querschnitten zu bestimmen.

4. Statistische Verteilungen von Einwirkungen und Widerständen

4.1 Allgemeines

Die Modellierung der Einwirkungen sollte so anspruchsvoll wie die Analyse des Tragwerks ausgeführt werden. Eine grobe Schätzung der Einwirkungen sollte nicht mit einer detaillierten Analyse des Tragwerks kombiniert werden und umgekehrt. Von der Systematik her hängt nach Schüeller (1981) der Zuverlässigkeitsindex von der maximalen oder extremen Einwirkung ab. Daher ist die Belastung als eine Folge von voneinander unabhängigen seltenen Zufalls Aktionen mit hoher Intensität (Pulsverfahren) zu betrachten. Die probabilistische Analyse von Ereignissen oder Lastkombinationen ist datenintensiv und benötigt Informationen, um die Häufigkeit, Dauer und Intensität aller Lasten zu beschreiben, die das Leistungsvermögen des Tragwerks beeinflussen, Ellingwood (1995). Für die Beschreibung sind Extremwertverteilungen oder asymptotische Verteilungen am besten geeignet. Selbst wenn die Stichprobe durch eine Normalverteilung um den Mittelwert beschrieben werden kann, passen oftmals die Zweige von Extremwertverteilungen gut, Schüller (1981).

EN 1990 (2002) gibt beispielhaft einige grundlegende Informationen über statistische Verteilungen für Einwirkungen und Widerstände, zusätzlich erweitert und aktualisiert entsprechende Literatur diese grundlegenden Informationen. EN 1990 (2002) zum Beispiel gibt allgemeine Informationen über die Bestimmung der Einwirkungen und Widerstände durch Quantilwerte; DIN 19702 (2013) präzisiert für Deutschland die Quantilen von veränderlichen Einwirkungen für technische Nutzungsdauern von Wasserbauwerken, die $T_N = 100$ Jahre betragen.

4.2 Einwirkungen

Eigenlasten und Eigengewichte sind Einwirkungen, die zufällig in ihrer Größe, aber in ihrer Position festgelegt und in der Regel zeitlich invariant sind. Sie ergeben sich aus dem Gewicht der Struktur und der ständigen Ausrüstung und Auflasten. Sie werden in der Regel durch eine Normalverteilungsfunktion modelliert, siehe EN 1990 (2002), Grünberg (2004), Ellingwood (1995) und Siemes/Vrouwenvelder (1984).

Nutzlasten (Arbeitslasten) werden entweder nach dem Borges-Castanheta-Modell modelliert oder auch mit dem Gumbel-Verteilung, siehe Grünberg (2004). Nutzlasten können alternativ auch durch Lognormal-, Gamma- oder GUMBEL-Verteilungen beschrieben werden, siehe Spaethe (1992) oder Siemes/Vrouwenvelder (1984).

Hydrometeorologische Einwirkungen, z.B. Wasserstände, werden mit Exponential-, Weibull- oder GEV/GPD-Verteilungen mit jährlichen Extremwerten modelliert. Extreme Hochwasserstände, z.B. für Hochwasser-Analysen und für die Ermittlung der damit zusammenhängenden Teilsicherheitsbeiwerte werden durch die GUMBEL Verteilungen modelliert, siehe Plate (1993), Fischer (2001), während Niedrigwasser-Analysen mit der Weibull-Verteilung beschrieben werden können, siehe Plate (1993). In den USA wird als Wahrscheinlichkeitsverteilung für die jährlichen Hochwassermaxima der log-PEARSON-III-Typ empfohlen, Ellingwood (1995). Die jährliche Wahrscheinlichkeit eines charakteristischen Wasserstands oder eines Wasserdruck-Ereignisses wird häufig zu $p = 0,01$, vgl. Ellingwood (1995), DIN 19702 (2013), gewählt. Manchmal ist die Definition einer Probable Maximum Flood (PMF) angemessen, falls dieses Ereignis nicht durch den Betrieb der wasserbaulichen Anlage bewältigt werden kann, Ellingwood (1995). Problematisch für die Aufarbeitung einer Statistik ist es, eine Aufzeichnung über einen belastbaren Zeitraum zu erhalten, um auf künftige Zeiträume schließen zu können, was bestimmte Bemühungen erfordert.

Wind- und Schneelasten werden oft als GUMBEL-Verteilung modelliert, EN 1990 (2002), Grünberg (2004) oder Ellingwood (1995). Theoretisch bildet die Gamma-Verteilung, die nicht einfach zu handhaben ist, Schneelasten durchaus besser als die Gumbel-Verteilung ab. Rackwitz (1996). Siemes/Vrouwenvelder (1984) empfehlen die Weibull-Verteilung für Windlasten und die Lognormal- oder GUMBEL-Verteilung für Schneelasten.

Außergewöhnliche Einwirkungen können mit einem Poisson-Prozess oder vielleicht auch mit dem Borges-Castanheta-Modell, Grünberg (2004), modelliert werden. Die Verteilung für z.B. Anprall selbst ist von verschiedenen, zusammenwirkenden Einflüssen wie der Masse des Aufprallobjekts (Normalverteilung), der Aufprallgeschwindigkeit oder Beschleunigung (Lognormalverteilung), der Steifigkeit des Aufprallobjekts (deterministisch) und dem Aufprallwinkel (Rayleigh-Verteilung) abhängig, siehe EN 1991-1-7 (2006).

Erdbeben-Einwirkungen gehören zu einem Poisson-Prozess, während die Extremwerte der Erdbebenbeschleunigung in Mitteleuropa am besten durch die Weibull-Verteilung, vgl. Rackwitz (2006), oder die Gumbel-Verteilung, Schüller (1981), modelliert werden. Für Wasserbauwerke werden die hydrodynamischen

Massen-Kräfte nach der Westergaard-Gleichung bestimmt, siehe Ellingwood (1995).

Eine weitere Gruppe von Einwirkungen umfasst die Betriebslasten, die aus dem Betrieb des Wasserbauwerks bzw. der Schifffahrtsanlage herrührt. Beispiele sind hydrostatische Last, Ausrüstungs-Last und betriebliche Lasten, Ellingwood (1995).

4.3 Widerstände

Materialfestigkeiten und -widerstände für Stahl, Betonstahl und Beton werden durch Lognormalverteilung modelliert, EN 1990 (2002), Grünberg (2004), oder – für untere Quantilwerte – durch eine Weibull-Verteilung, Schüller (1981).

5. Anschauungsbeispiel

Um die Ergebnisse der untersuchten unterschiedlichen semi-probabilistischen Bemessungs-Methoden aufzuzeigen, entschied die Arbeitsgruppe PIANC 140, einige Beispiele von einem oder mehreren Mitgliedsländern und in mehr oder weniger Tiefe auszuarbeiten. Typische Beispiele für Wasserbauwerke wie ein massiver Schleusen-Querschnitt, ein Träger eines Hubtors, ein Kaimauer-Wandabschnitt sowie ein massive Hochwasser-Schutzmauer nach dem Schwergewichtsprinzip wurden nach verschiedenen semi-probabilistischen Normen bearbeitet.

Als Beispiel wird eine massive Hochwasser-Schutzmauer nach dem Schwergewichtsprinzip gezeigt, Abbildung 3.

Die Wand hat einen Trapezquerschnitt und besteht aus unbewehrtem Beton. Auf der Hochwasser-Seite ist die Wand auf etwa einem Viertel der Wandhöhe im Boden eingebunden. Auf der Rückseite ist die Wand vollständig im Boden eingebettet, der Grundwasserspiegel liegt etwa auf der Hälfte der Wandhöhe. Die Einwirkungen sind das Eigengewicht des Betons als ständige Last, Wasserdruck auf beiden Seiten der Wand als veränderliche Einwirkung sowie der Erddruck als Ruhedruck als ständige Einwirkung angenommen.

Für die Anwendung des amerikanischen LRFD Konzepts wurden die Parameter speziell entwickelt. Normalerweise werden in den USA verschiedene Lastkombinationen wie seltene Hochwasserstände, eine ungewöhnliche und eine extreme Hochwasserlage, zwei verschiedene Erdbeben-Bedingungen und ein Bauzustand betrachtet. In diesem Beispiel wird hier nur das seltene Hochwasser-Ereignis untersucht. Teilsicherheitsbeiwerte wurden analog EM 1110-2-2104 (2003) und EM 1110-2-2105 (1994) bestimmt. Somit ist der Teilsicherheitsfaktor PF für Eigengewicht und vertikalen Erddruck $PF = 1,2$, für den Wasserdruck bei Hochwasser, für den Porenwasserdruck und für den seitlichen Erddruck $PF = 1,6$. Teilsicherheitsbeiwerte für die Widerstände innerhalb der Nachweisformate sind $PF = 0,9$ für Gleiten, $PF = 1,0$ für Kippen und $PF = 0,9$ für die Tragfähigkeit. Die Tragfähigkeit wird durch die Tragfähigkeitstheorie nach Meyerhoff, einer Grundbruch-Theorie, die auf flachen und tiefen Gründungen angewendet werden kann, berechnet.

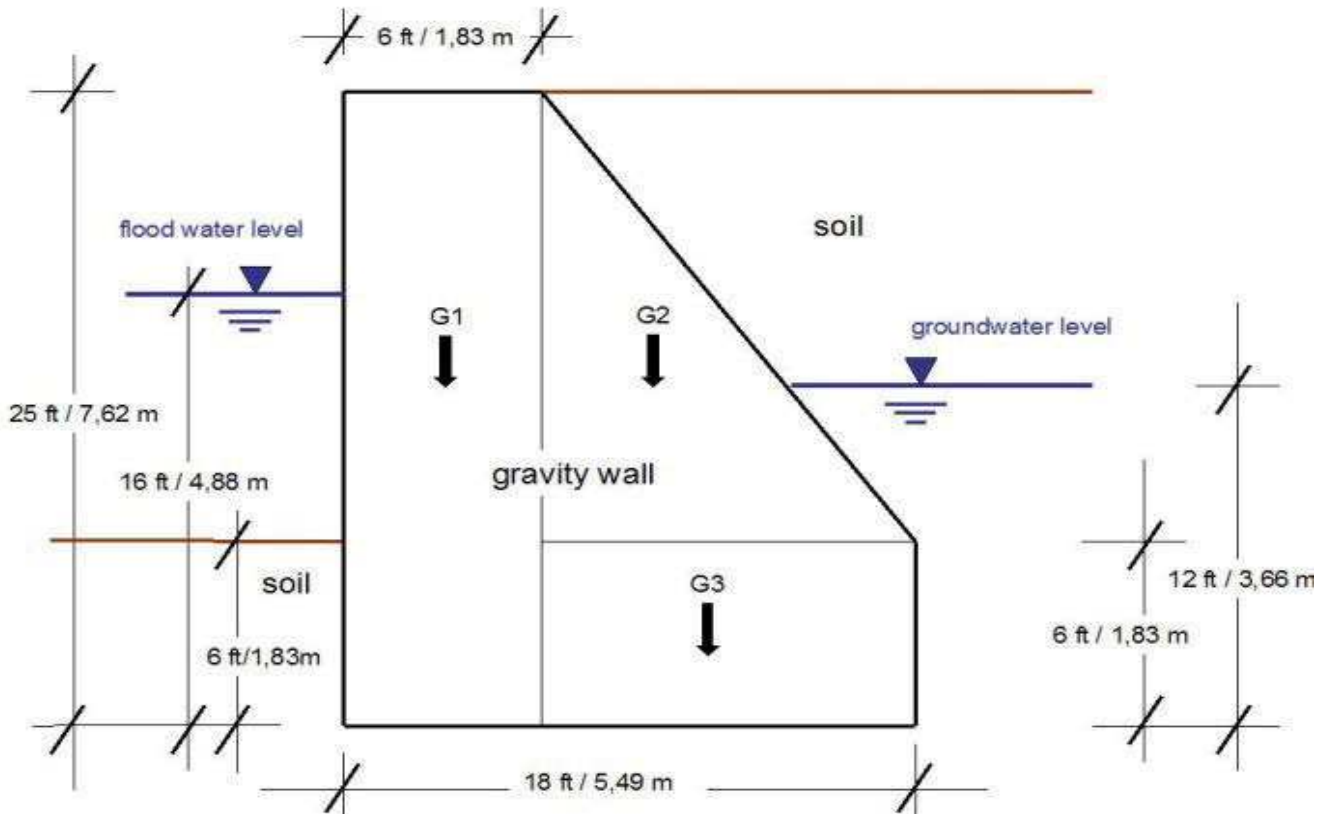


Abbildung 3: Massive Hochwasser-Schutzmauer nach dem Schwergewichtsprinzip, PIANC WG 140 (2014)

In den Nachweisformaten für Gleiten und Tragfähigkeit werden die Einwirkungen faktorisiert, für Kippen wird mit Gebrauchslasten bemessen. In US-amerikanischen Nachweisen wird häufig ein Verhältnis zwischen Bemessungs-Beanspruchung und Bemessungs-Widerstand gebildet und mit „Sicherheitsfaktor FS“ bezeichnet; da dieser Wert bereits auf faktorisierte Einwirkungen und Widerstände bezogen ist, handelt es sich nicht um einen globalen Sicherheitsfaktor im herkömmlichen Sinn. Für Gleiten wird der Sicherheitsfaktor $FS_d = 1.89$ berechnet, für die Tragfähigkeit $FS_d = 1.87$. Die Lastexzentrizität liegt bei $e = 1.32$ ft, die kleiner ist als $L/6 = 3.0$ ft. Dies bedeutet, dass eine Zugzone bzw. ein Klaffen nicht auftreten. Die Bodenspannung wurde zu $\sigma = 7.26$ ksf (entspricht 347.6 kN/m²) berechnet.

Die vergleichende Berechnung aus deutscher Sicht verwendete die Einwirkungen aus der amerikanischen Berechnung und kombinierte sie mit den Grenzzustandsfunktionen nach (DIN) EN Normung. Analysiert wurde die Gesamtstabilität nach DIN EN 1997-1 (2009) und die Tragfähigkeit nach DIN EN 1992-1-1 (2011) und DIN 19702 (2013). Für die Gesamtstand-sicherheit wurden die Nachweisforma-te:

- EQU: Kippen
- GEO-2: Gleiten
- UPL: Auftrieb
- SLS: Lastexzentrizität (nur mit charakteristischen Werten)

und für die Tragfähigkeit:

- STR: Druckfestigkeit (Biege- und axiale Kräfte) und Querkraftnachweis

berücksichtigt.

Bemessungssituation ist BS-P, die ständige Bemessungssituation gem. EN 1990 (2002), weil die Verhinderung von Hochwasser das Ziel der Wand ist und daher die Einwirkung „Hochwasser“ mehrmals (mindestens einmal) in der Lebensdauer erwartet werden darf.

Die angesetzten Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen UPL, EQU und GEO -2 aus DIN EN 1997-1 (2009) und STR aus DIN 19702 (2013), sind:

	UPL	EQU			STR/GEO-2
$\gamma_{G,dst}$	1,05	1,10		$\gamma_{G,sub}$	1,35
$\gamma_{G,stab}$	0,95	0,90		$\gamma_{G,inf}$	1,00
$\gamma_{Q,dst}$	1,50	1,50		$\gamma_{Q,sub}$	1,50
$\gamma_{Q,dtb}$	0	0		$\gamma_{Q,inf}$	0 / 0,80 ¹⁾
				$\gamma_{E0,g}$	1,20
¹⁾ für Wasser als veränderliche Einwirkung in STR, gem. nach DIN 19702 (2013)					

Tabelle 6: Teilsicherheitsbeiwerte für Aktionen (Beispiel)

und für Widerstände STR aus DIN EN 1992-1-1 (2011) und GEO-2 aus DIN EN 1997-1 (2009):

	STR	GEO-2
$\gamma_{C,pl}$	2,15	
$\gamma_{R,h}$		1,10

Tabelle 7: Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstände (Beispiel)

Alle Nachweise ergeben eine ausreichende Bemessung für die Hochwasser-Schutzmauer. Die nachfolgend dargestellten Sicherheitsfaktoren FS_d aus der deutschen bzw. Eurocode-Nachweisführung sind lediglich zum Vergleich mit den amerikanischen Ergebnissen aufbereitet. Für die Gesamtstandsicherheit (Gleiten) liefert die Vergleichsberechnung eine ebenfalls ausreichende Sicherheit, der Sicherheitsfaktor $FS_d = 2,05$ (im Vergleich zu US: 1,89). Die Vergleichsrechnung für Kippen führt zu einem Sicherheitsfaktor $FS_d = 1,72$ (kein direkter Vergleich mit US). Für die Lastexzentrizität wird ein $e = 0,73$ m (entsprechend zu 2,39 ft, im Vergleich mit US: 1,32 ft) ermittelt, das kleiner als $L/6 = 0,92$ m ist. Auch hier entstehen weder Zugzone noch Klaffung.

Die maximale Bodenpressung beträgt $\sigma = 243$ kN / m² (im Vergleich zu US: Es 347,6 kN / m²). Die Berechnung für die Auftriebssicherheit führt zu einem Sicherheitsfaktor $FS_d = 3.68$ (kein Vergleich mit US). Die Überprüfung des Grenzzustands für die Tragfähigkeit, hier liegt kein Vergleichswert zur amerikanischen Untersuchung vor, zeigt ebenfalls eine ausreichende Sicherheit.

US-amerikanische und deutsche Nachweisführungen für eine massive Hochwasser-Schutzmauer nach dem jeweiligen Teilsicherheitskonzept führen nicht zu größeren Unterschieden bei Sicherheitsfaktoren oder anderen relevanten Ergebnissen. Die gezeigten Grenzzustände sind oftmals vom gleichen Typ. Die Lastexzentrizität wird in beiden Nachweisführungen mit charakteristischen Werten berechnet. Für weitere Beispiele siehe PIANC (2014).

6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Untersuchungen der PIANC Arbeitsgruppe 140 zeigte, dass das Teilsicherheitskonzept für die Bemessung von Wasserbauwerken durch alle teilnehmenden Mitgliedsländer angewendet wird. Im Wesentlichen standen in der Arbeitsgruppe das EUROCODE-Konzept und das LRFD-Konzept zur Untersuchung an. Diese semi-probabilistischen Bemessungs-Konzepte scheinen „best practice“ zu sein. Soweit die exemplarischen Beispiele zeigen können, führen die jeweils nationalen Entwurfsmethoden der teilnehmenden Länder für Wasserbauwerke nur zu geringen Unterschieden in den Ergebnissen. Dies ist teilweise auf geringe Unterschiede in den Teilsicherheitsbeiwerten oder in geringfügigen Unterschieden zwischen den jeweiligen Produkten aus dem Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen mit dem für Widerstände, $\gamma_F * \gamma_M$ bzw. $\gamma_i * 1/\Phi$, zu erklären. Bei einigen Nachweisformaten führt die im EURO-

CODE verankerte Regelung bezüglich günstiger/ungünstiger Teilsicherheitsbeiwerte zu etwas größeren Unterschieden. So wird ein Schleusenhalbrahmen aus Stahlbeton nach EUROCODE auf Außen- und Innenseite gleichmäßiger und konsistenter bewehrt als nach LRFD Konzept, was bei etwa gleich großen Kräften und etwa gleich großen Variationskoeffizienten beiderseits des Schleusenhalbrahmens auch vernünftig erscheint, PIANC (2014).

Eine intensivere Analyse der wichtigsten Unterschiede zwischen den bestehenden semi-probabilistischen Normenkonzepten wäre wünschenswert, um mehr Einblick zu erhalten und die oben genannten Aussage zu verallgemeinern.

Ein neuer Aspekt wäre es, für alle Wasserbauwerke oder für gleiche Typen von Wasserbauwerken eine einheitliche Zuverlässigkeit, ggf. auch nach Risikoklassen, festzulegen. Die Notwendigkeit einer internationalen Norm für die Bemessung von Wasserbauwerken wird nicht unbedingt gesehen, zumal sich die zumindest von der PIANC Arbeitsgruppe untersuchten semi-probabilistischen Konzepte ähneln. Derzeit scheint die Eurocode-Bemessung ausgereifter als das LRFD Konzept zu sein.

Falls vorhanden, sollte die Bemessung auf Spezialnormen für Wasserbauwerke zurückgreifen, da diese besondere, zum Teil auf lange Erfahrungen basierende Erkenntnisse berücksichtigen. Vier (USA, CN, NL, D) der sieben teilnehmenden Länder verwenden spezielle Normen, während die anderen die normalen Bauvorschriften anwenden. Aufgrund der bestehenden Eurocodes, die für ein bauartübergreifendes Sicherheitskonzept stehen, sollten spezielle Wasserbauwerksnormen in Europa auf diesen Eurocodes basieren. Dadurch wird eine besondere Harmonisierung von Normen für Wasserbauwerke nicht erforderlich.

Durch die von der PIANC Arbeitsgruppe 140 behandelten Fragestellungen sind ebenfalls einige maritime Aspekte berücksichtigt worden, weil sie sich nicht von denen im Binnenbereich unterscheiden. Maritime Besonderheiten, wie z.B. die Bestimmung von Welleneinwirkungen auf Bauwerke sind nicht intensiv abgedeckt worden.

Literatur

AASHTO (2012). American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD bridge design specifications, 6th edition, Washington D.C., 2012.

ACI 318 (2011). "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary". American Concrete Institute. 2011.

DIN 19702 (2013). Massive Wasserbauwerke: Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Beuth-Verlag, Berlin, 2013.

DIN EN 1992-1-1 (2011). Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; einschließlich Nationaler Anhang, 2011.

DIN EN 1997-1 (2009). Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln; einschließlich Nationaler Anhang. 2009.

Ellingwood, B.R. (1995). Event Combination Analysis for design and rehabilitation of U.S. Army Corps of Engineers Navigation Structures. Final report ITL-95-2, July 1995.

EM 1110-2-2104, (2003). Strength design for reinforced concrete hydraulic structures. US Army Corps of Engineers, Washington D.C., 2003.

EM 1110-2-2105, (1994). Design for hydraulic steel structures. US Army Corps of Engineers, Washington D.C., 1994.

EM 1110-2-2106, (2008). Design for precast and prestressed concrete for hydraulic structures. US Army Corps of Engineers, Washington D.C., 2008.

EN 1990 (2002). Eurocode - Basis of structural design; EN 1990:2002/A1:2005 Eurocode - Basis of structural design.

EN 1991-1-7 (2006). Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-7 : General actions – Accidental actions.

EN 1992 (2004).: Eurocode 2: Design of concrete structures – Parts 1-1 and 1-2.

EN 1993 (2004).: Eurocode 3: Design of steel structures – Different Parts.

Fischer L. (2001). Das neue Sicherheitskonzept im Bauwesen - ein Leitfaden. Bautechnik Spezial, Verlag Ernst&Sohn, Berlin, 2001.

Gruenberg J.(2004). Grundlagen der Tragwerksplanung – Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln für den konstruktiven Ingenieurbau, Erläuterungen zu DIN 1055-100. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin 2004.

PIANC (2014), Report “Semi probabilistic design of hydraulic inland structures”, PIANC, InCom WG 140, Brussels (in preparation).

Plate E. (1993). Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitstheorie für Bauingenieure. Verlag Ernst&Sohn, Berlin, 1993.

Rackwitz R. (1996). Der Ingenieurbau, Band 9: Tragwerkszuverlässigkeit, Einwirkungen. (Hrsg.) Mehlhorn, G. Verlag Ernst&Sohn, Berlin, 1996.

Schüller G. (1981). Einführung in die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken. Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin – München, 1981.

Siemes, A. ; Vrouwenvelder, A. (1984). Veiligheid van bouwconstructies. TNO-rapport B1-84-36, TNO, Delft, juli 1984.

Spaethe G. (1992). Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen. Verlag Springer, Wien – New York, 1992.

Verfasser

Dipl.-Ing. Claus Kunz
Bundesanstalt für Wasserbau
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe
Tel.: 0721/9726-3200
E-Mail: claus.kunz@baw.de