PIANC•AIPCN

The World Association for Waterborne Transport Infrastructure

XXXIV.
Internationaler Schifffahrtskongress

Panama City (Panama)
07. - 11. Mai 2018

34th PIANC WORLD CONGRESS
PANAMA 2018 May 7 to 11

Deutsche Beiträge

Bonn 2020

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 auszugweise, sind ohne schriftliche Zustimmung der deutschen Sektion von PIANC nicht gestattet.

Bonn, April 2020

Vorwort

Gastgeber für den 34. Internationalen PIANC – Schifffahrtskongress, der vom 07.-11. Mai 2018 in Panama City stattfand, war die Panama Canal Authority (ACP).

Die globalen Herausforderungen für die Schifffahrt und deren Infrastruktur sorgten wieder für spannende Diskussionen im Wettstreit für beste Lösungen. Dabei sind Themen wie Klimawandel und Anpassungsstrategien wie auch die frühzeitige Berücksichtigung von Umwelt und Natur bei der Planung nicht wegzudenken. Die Erweiterung des Panama-Kanals, die im Juni 2016 nach 9-jähriger Bauzeit abgeschlossen war, war für alle Teilnehmer verständlicherweise ein absolutes Highlight. Gleichfalls wurden innovative Herausforderungen an den Wasserstraßen rund um die Themen Betrieb und Unterhaltung, Verkehrstechnik und Nachhaltigkeit behandelt.

Die komplexen 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 Infrastruktur für die Schifffahrt zugute. Technische, ökonomische und ökologische Wirkungen unserer Planungen können vielfach nur noch im internationalen Kontext vollständig erfasst und mit weiter gespannten Erfahrungen getragen werden. Die Schifffahrtskongresse von PIANC leisten dazu einen hervorragenden Beitrag.

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

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 kon-struktiven Erfahrungsaustausches und Wissenstransfers stellen.

Diese Zusammenstellung der deutschen Kongressbeiträge möchte ich unserem langjährigen Geschäftsführer der Deutschen Sektion, Herrn Uwe Fischer widmen und ihm auf diesem Wege ganz herzlich für sein Engagement für die deutsche PIANC-Sektion danken. Für seinen wohlverdienten Ruhestand wünsche ich ihm alles erdenklich Gute.

PIANC
- Abteilung Deutschland -

Dipl.-Ing. Michael Behrendt
Chefdelegierter
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

XXXIV. Internationaler Schifffahrtskongress
Panama City (Panama)
(07. - 11. Mai 2018)

ÜBERSICHT ÜBER DIE DEUTSCHEN BEITRÄGE

Seite

Wasserstraßeninfrastruktur: Schleusen, Wehre, Uferbefestigungen

BETRIEB UND WARTUNG VON SCHLAUCHWEHREN – ERFAHRUNGEN VON DEN DEUTSCHEN WASSERSTRASSEN 1
Dipl.-Ing. Thilo Wachholz, Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Standort Hannover

EIN ANWENDUNGSORIENTIERTES MODELL FÜR SCHLEUSENFÜLLPROZESSE 5
M.-Eng. Fabian Belzner, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
Dipl.-Ing. Franz Simons, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
Dr.-Ing. Carsten Thorenz, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

SCHLEUSENKAMMER IN BRUNSBÜTTEL 22
Dr.-Ing. Matthias Schäfers, IRS Stahlwasserbau Consulting AG, Würzburg
Frank Allgäuer, IRS Stahlwasserbau Consulting AG, Würzburg

STRÖMUNGSINDUZIERTE SCHWINGUNGEN AN WASSERBAUWERKEN 38
Dr.-Ing. Michael Gebhardt, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
Georg Göbel, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
Martin Deutscher, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
Walter Metz, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
Dr.-Ing. Carsten Thorenz, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Binnenschifffahrt

MULTIFUNKTIONALITÄT VON BINNENWASSERSTRASSEN - SOZIALES UND UMWELTBEWUSSTSEIN VON BINNENWASSERSTRAßENBETREIBERN 41
Dipl.-Ing. Andreas Dohms, Neubauamt für den Ausbau des Mittellandkanals, Hannover
Tom Denes, Arcadis, USA
Marc Demanet, SECO Belgien
Yvon Loyaerts, Öffentlicher Dienst Walloniens, Generaldirektion Mobilität & Wasserstraßen, Belgien

BINNENSCHIFFFAHRTSINFORMATIONSDIENSTE (RIS) IN DEUTSCHLAND 52
Nils Braunroth, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn
Wieland Haupt, Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, Fachstelle für Geoinformationen Süd, Regensburg

ASSISTENZSYSTEME FÜR DIE BINNENSCHIFFFAHRT BASIEREND AUF HOCHPRÄZISIONS-DGNSS (FORSCHUNGSPROJEKT LAESSI) 59
Dipl.-Ing. Rainer Strenge, Fachstelle Maschinenwesen, Koblenz
Dr.-Ing. Martin Sandler, in-innovative-navigation GmbH, Kornwestheim
Dipl.-Ing. Michael Hoppe, Fachstelle der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes für Verkehrstechniken, Koblenz
Dipl.-Ing. Martin Bröschel, Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Bonn
Dipl.-Ing. Larisa Burmisova, Fachstelle der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes für Verkehrstechniken, Koblenz

Dr.-Ing. Anja Hesselbarth, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Neustrelitz
Dr.-Ing. Ralf Ziebold, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Neustrelitz
Dipl.-Ing. Jürgen Alberding, Alberding GmbH, Wildau
Dipl.-Ing. Maik Uhlemann, Alberding GmbH, Wildau

FUNKNAVIGATIONSANWENDUNGEN IN DER SCHIFFFAHRT
(MARITIM UND BINNENBEREICH) 69
Michael Hoppe, Fachstelle der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes für Verkehrstechniken, Koblenz
Rainer Strenge, Fachstelle Maschinenwesen, Koblenz

ERFASSUNG, ANALYSE UND VERGLEICH DES DYNAMISCHEN FAHRVERHALTENS VON GRÖSSEN- UND TIEFGANGSRELEVANTEN FAHRZEUGEN AUF
UNTER- UND AUSSENELBE 78
Prof. Dr.-Ing. T. Albers, Ostfalia Hochschule, Campus Suderburg
B. Reiter, Ingenieurgesellschaft von Lieberman, Hamburg
F. Treuel, Technische Universität Hamburg
H. Jansch, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg
J. Behm, Wasserstraße- und Schifffahrtsamt Hamburg

Betrieb und Unterhaltung der Wasserstraßeninfrastruktur

RISIKOTREIBENDE FAKTOREN, IHRE INDIKATOREN UND DIE DARAUS RESULTIERENDEN ENTSCHEIDUNGSKRITERIEN: DER INTERDISZIPLINÄRE ANSATZ IN DEUTSCHLAND 84
Andreas Panenka, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
Julia Sorgatz, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
Julia Kasper, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

STRATEGIE ZUR AUSWAHL VON FEHLERURSACHEN FÜR REPARATUR- UND INSTANDSETZUNGSARBEITEN 93
François Marie Nyobeu Fangue, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
Andreas Panenka, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Hafen- und Marinaplanung, Hafenmanagement

RANG-E - INNOVATIONEN AUF DER LETZTEN MEILE IM BAHNVERKEHR - AUTONOMES RANGIEREN AUF DER BREMISCHEN HAFENEISENBAHN 111
Dr. Iven Kraemer, Freie und Hansestadt Bremen, Der Senator für Wirtschaft, Arbeit und Häfen

SCHIFFSFÜHRUNGSSIMULATION FÜR DIE AUSLEGUNG VON HAFENZUFAHRTEN UND HAFENANLAGEN 114
Dr.-Ing. Carl-Uwe Böttner, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg

OPTIMIERUNG VON VERTÄUEINRICHTUNGEN UND HAFENSTRUKTUREN DURCH DYNAMISCHE BERECHNUNG DER VERTÄULASTEN 118
Dr. Oliver Stoschek, DMT GmbH & Co. KG, Hamburg
Stefan Leschka, DHI WASY GmbH, Bremen
Anja Brüning, SEE-Ingenieure GmbH & Co. KG, Emden
Christian Hein, bremenports GmbH & Co. KG, Bremerhaven

Fragen des Umweltschutzes

STROMBAUMAßNAHMEN FÜR WIRTSCHAFT, UMWELT UND GESELLSCHAFT 132
Dr. Kirsten Wolfstein, Hamburg Port Authority, Hamburg

Erfahrungen von den deutschen Wasserstraßen

von Thilo Wachholz[1]

1. Einleitung

Aufgrund ihres Alters müssen sehr viele Objekte der Bundeswasserstraße durch neue Wasserbauwerke ersetzt werden. Für zahlreiche Wehre gaben die einfache Konfiguration und die erwartete Effizienz die Grundlage für eine Gestaltung als Schlauchwehr. Diese Technologie war zunächst im Bundeswasserstraßennetz neu. Die heutigen Erfahrungen mit dem Betrieb und der Unterhaltung der Schlauwehrtechnik von jetzt über 10 Jahren erlaubt den Schluss, mehr weitere Wehre mit diesem Verschlusstyp auszustatten.

2. Grundlegende Aspekte

Die ersten Projekte dieser Art an Deutschen Wasserstraßen basierten auf einer langen Phase von internen Diskussionen, gefolgt von Tests und Prüfungen, um der Kritik zu begegnen, die mit der bis dahin in Deutschland unbekannten Technik einherging. Kostenanalysen, die zu Beginn des Planungsprozesses durchgeführt wurden, zeigten, dass die Wahl eines Schlauchwehres viel effizienter ist als der Bau eines Stahltors. Die Projekte sind hauptsächlich darauf ausgerichtet, den Wasserstand für die Navigation zu kontrollieren. Aufgrund der Tatsache, dass die Verschlussorgane in der Regel in Kooperation mit Wasserkraftwerken betrieben werden müssen, muss die Regelung der Wasserstände ausreichend schnell und genau mit dieser Anlage erledigt werden. Daher werden an Deutschen Wasserstraßen wassergefüllte Schlauchwehre gewählt.

Abbildung 1: Wehr Marklendorf an der Aller – erstes Schlauchwehre in Deutschen Wasserstraßen

3. Betrieb und Unterhaltung an deutschen Wasserstraßen

Die Schlauwehre, die ausschließlich an deutschen Wasserstraßen verwendet werden, erfordern einen unterirdischen Raum für Pumpen und Rohrleitung und demzufolge eine aufwendigeres Bauwerksteil. Es muss sichergestellt sein, dass dort genügend Platz vorhanden ist, um die Räume zu betreten und Wartungs- und Inspektionsarbeiten zu ermöglichen. Dennoch beträgt die Größe des Betriebsgebäudes ca. 5% der globalen Projektkosten. Die Empfehlung lautet, diesen Teil der Kosten des Projekts nicht zu sehr in den Fokus zu nehmen. Das Gleiche gilt für die Installationskosten der Ausrüstung (Pumpen, Rohleitung).

Abbildung 2: Einblick in den Installationsraum des Betriebsgebäudes

Wie bei jeder modernen, verstellbaren Verschlusskonstruktion müssen Schlauchwehre von einem System angetrieben und kontrolliert werden, das automatisch arbeiten kann. Die Anordnung der Regler, Ventile, Instrumente und Sensoren wird von der vor Ort installierten Software (SPS) gesteuert. Beispielsweise erfassen die Sensoren der piezoelektrischen Druckmesszellen eine Erhöhung des Referenzwasserpegels vor dem Damm. Die Software stellt fest, dass eine Entlastung des Mediums notwendig ist. Da regulier das Steuersystem den Abfluss aus dem Schlauch. Bei allen Projekten ist eine Fernsteuerung erforderlich, um das Wehr zu überwachen und ggf. zu justieren. Videoüberwachung benötigt viel höhere Standards. Daher ist eine solche Installation bei Wehre in Deutschen Wasserstraßen nicht vorgesehen.

Betreffend die regulären Betriebsverfahren, so sind die Anforderungen wie bei gewöhnlichen Wehren. Ein Schlauchwehr besitzt zwei oder drei Betriebsmodi: manuell, automatisch und manchmal fernbedient. Ob außergewöhnliche und unregelmäßige Situationen zu berücksichtigen sind, ist abhängig von

1 Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Deutschland, thilo.wachholz@wsv.bund.de

der Lage des Damms oder Bedingungen wie längere Hochwasser oder Eis. Für letzteren Fall muss sichergestellt werden, dass die Einlassverrohrung und der Messschacht nicht einfrieren, sodass ein Heizsystem notwendig werden kann.

In der Regel wird vom Hersteller des Systems ein Betriebs- und Wartungshandbuch zur Verfügung gestellt. Neben der Darstellung der Vorgänge erläutert das Handbuch die Inspektions- und Wartungsfragen. Beide dienen der strukturellen Untersuchung und Bewertung der Membran, des Befestigungssystems und der gesamten Funktionalität des Wehrs. Genau wie die anderen Wehrarten weisen Schlauchwehre Komponenten auf, die eine standardisierte Inspektion erfordern. Die Komponenten der mechanischen und elektrischen Ausrüstung sowie deren Funktionskontrolle sollten ebenfalls Bestandteil von Routineuntersuchungen sein. Regelmäßige Inspektionen und Wartungen führen zu einer Schlussfolgerung bezüglich des eventuellen Austauschs des Gummitors gegen Ende seiner Lebensdauer.

Die Schlauchmembran hat andere Merkmale als ein Stahltor. Dies erfordert ein anderes Prüfprotokoll. Die Hauptziele der Inspektion der Verschlusseinheit sind die folgenden:

- Abrieb.
- Altersbedingte Verschlechterung.
- Schäden durch Trümmer oder Steine.

Sobald Schäden während der Inspektion festgestellt werden, sollte die Membran repariert werden. Dazu gibt eine große Sammlung von einfachen Reparaturhilfsmitteln, die von den Herstellern angeboten werden. Inspektion und Wartung für Schlauchwehre sind sehr wichtig. Inspektionsberichte sollten katalogisiert und möglichst an der Wehranlage gelagert werden. Die permanente Wartung und das Trockenlegen alle 6 Jahre sind von der Wartungsmannschaft leicht zu realisieren.

Abbildung 3: Inspektion eines Schlauchwehres

Vorbeugende und korrektive Instandhaltungsmaßnahmen sollten so lange wie möglich durchgeführt werden, damit das Schlauchwehr langfristig wirksam bleibt. Die Wartungsanforderungen für ein Schlauchwehrsind signifikant verschieden wie für ein Stahlverschluss. Die Membran wird im Allgemeinen als nahezu wartungsfrei angesehen, mit Ausnahme von gelegentlichen Reparaturarbeiten, wie unten diskutiert. Es gibt keine Anstrichanforderungen oder Korrosionsprobleme, auch keine beweglichen Teile, die zu untersuchen oder reparieren wären. Die mechanische und elektrische Ausrüstung erfordert regelmäßige Wartung. Es handelt sich aber bei diesen Komponenten um Standards wie Kompressoren, Rohrleitungen und Pumpen. Das primäre Interesse liegt auf der Untersuchung des Alterungsprozesses der Membran während der Lebensdauer. Während des Alterungsprozesses verliert die Membran an Festigkeit.

Als Schlussfolgerung, die Inspektionen und die Wartung eines Schlauchwehres beschränken sich normalerweise auf visuelle Inspektion, Funktionstests und - falls angezeigt - auf das Beheben von

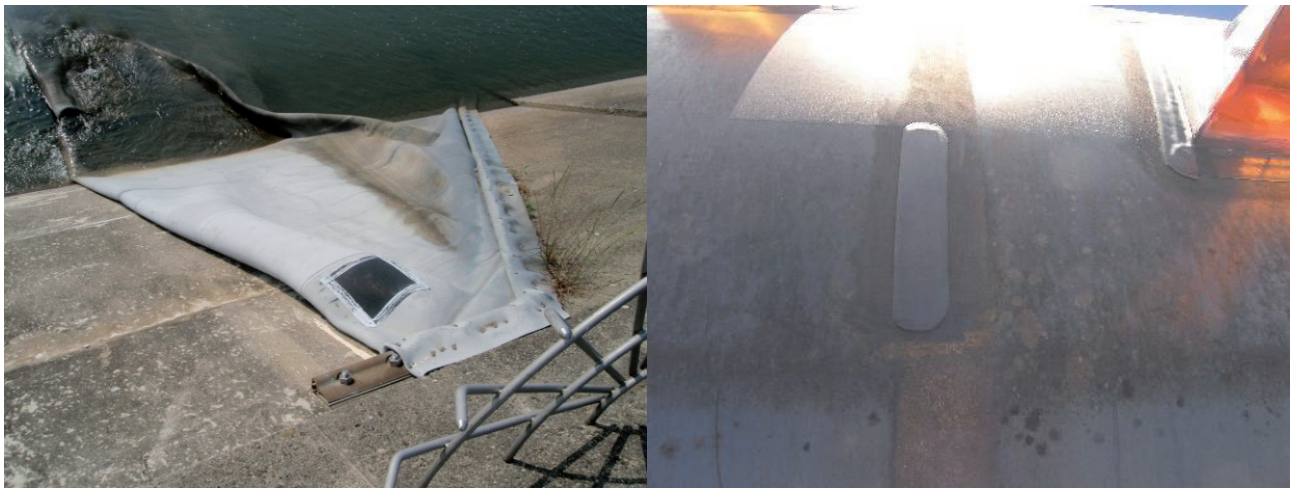


Abbildung 4: Reparaturstellen eines Schlauchverschlusses

Undichtigkeiten und Reparaturen. Die erforderlichen Wartungsarbeiten des Außendienstpersonals sind in der Regel niedriger als bei einem Stahlverschluss. Daher können die Wartungskosten von Schlauchwehren im Vergleich zu herkömmlichen Stahlverschlüssen beträchtlich niedriger sein.

Es gibt Fälle, in denen die Membran beschädigt wird. Dies beinhaltet eine Delamination der Oberfläche aufgrund von Alterung oder Verschleiß. Normalerweise erfordern Risse und insbesondere ein begrenztes Loch in der Membran keinen vollständigen Austausch des Schlauchverschlusses. Das Fasergewebe in der Membran ist verantwortlich für die Aufteilung der Kraft in zweidimensionale Richtung. Aus diesem Grund wird ein beschädigt beschädigter Bereich ausreichend unterstützt, um der Sicherheit kleiner Schadenseffekte standzuhalten. Schäden in den Ecken der Schlauchverschlüsse müssen mit großer Aufmerksamkeit überwacht werden. Einige Reparaturarbeiten sind im trockenen Zustand durchzuführen. Daher sollte die Wartung während der Niedrigwasserperiode oder in Perioden während des Platzierens der Revisionsverschlüsse durchgeführt werden. Der Austausch des Schlauchverschlusses muss unter Bezugnahme auf die Prüfprotokolle und die Überprüfung auf Fehlfunktionen der Ausrüstung, Beschädigung von Teilen, Alterung von Teilen usw. entschieden werden.

4. Kriterien für die bevorstehenden Projekte

Die Haltbarkeit eines Schlauchverschlusses variiert in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen (Ermüdung aufgrund der Häufigkeit des Aufblasens und Entleerens) und der Umgebung auf der Einsatzstelle (Verschlechterung durch ultraviolette Strahlen und Wärmealterung). Je nach Einsatzort und Anwendung ist die Membran unterschiedlichen Wasserbedingungen, Temperaturextremen und Belastungsbedingungen ausgesetzt. Langjährige Erfahrungen, insbesondere aus Japan, zeigen, dass Schlauchmembranen dennoch mehr als 30 Jahre zufriedenstellend funktionieren. Der Sicherheitsfaktor für die Berechnung der Stabilität, der für die Konstruktion des Schlauchverschlusses verwendet wird, berücksichtigt diesen Zeitraum der Lebensdauer. Es kann festgestellt werden, dass nach zwei Jahrzehnten der Anwendung die Membran genauer betrachtet werden muss und die Inspektionsintervalle zu verkürzen sind.

Abgesehen von den Maximalwerten weltweit installierter Schlauchwehre zeigt sich, dass bei 88% der Installationen die Höhe weniger als 3,0 m beträgt. Bei 70% beträgt die Spannweite weniger als 30,0 m. Diese Durchschnittswerte können allgemein als typische Abmessungen von Schlauchwehren angesehen werden, während die Maximalwerte angeben, was im Einzelfall machbar ist. Im Allgemeinen sind Schlauchwehre am besten für große Spannweiten mit einer kleinen Anzahl von Pfeilern geeignet, was sie in der Landschaft relativ unauffällig macht.

In Bezug auf die Anzahl der Anwendungen kann schlussgefolgert werden, dass Schlauchwehre bis zu einer gewissen Grenze grundsätzlich als bewährte Technologie gilt. Die Festlegung eines oberen Grenzwertes für die Höhe von Schlauchwehren ist allerdings schwierig. Im Allgemeinen gilt diese Technologie mit einer sehr großen Anzahl von Installationen bis zu 3,0 m als Stand der Technik. Auch darüber hinaus gibt es eine ganze Reihe von Schlauchwehren mit guten Erfahrungen. Zum Vergleich ist der Anwendungsbereich der japanischen Norm für Schlauchwehre durch eine Höhe von 6,0 m begrenzt. Seit 1978 gibt diese Norm eine

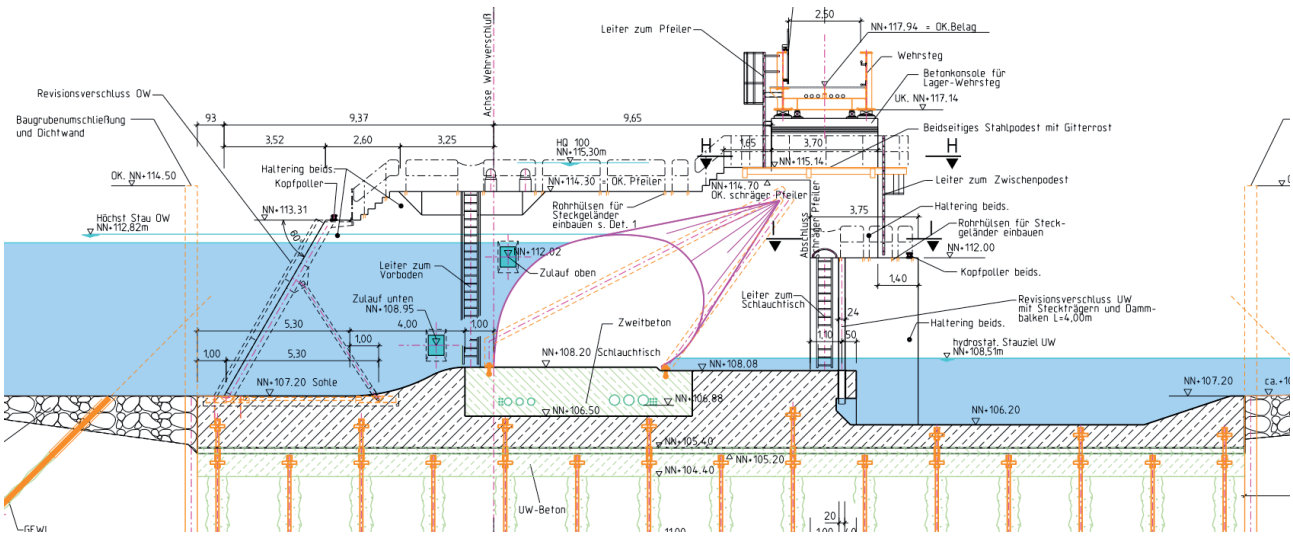


Abbildung 5: Neues Schlauchwehrprojekt am Main

solide Grundlage für die Konstruktions- und Materialanforderungen. Die meisten der mittlerweile realisierten Wehre haben eine Breite von mehr als 20 m und Höhen von bis zu 3,4 m.

Die Wehrinfrastruktur ist als Standardbetonkonstruktion konzipiert und verursacht zehn Mal höhere Kosten als die Membran selbst. Die Ausrüstung (Klemmen, Rohre, Ventile, Pumpen usw.) kostete ungefähr die Hälfte der Kosten im Vergleich zu der Membran, ähnlich ist die elektromechanische Ausrüstung.

5. Schlussfolgerungen

In den letzten Jahren wurde die Technologie Schlauchwehre verbessert und die Standards angepasst. Heute sind sie eine interessante Alternative zu herkömmlichen Stahlverschlüssen, wodurch Einsparungen bei den Investitions- und Wartungskosten möglich sind. Das gilt insbesondere für Standorte, an denen diese Verschlussarten an bestehende Wehrstrukturen angepasst werden. Ein zunehmender Nutzen dieser Technologie ist zu beobachten und wird zu einer „Standardisierung“ führen.

Die Erfahrungen aus dem Betrieb seit den ersten deutschen Projekten sind absolut zufriedenstellend. Die Membranen sind unversehrt und voll funktionsfähig, die erwarteten Lebensdauern betragen jetzt 30 Jahre. Derzeit muss die Strategie nicht geändert werden, im Gegenteil. Nach den oben genannten Kriterien erstellt die deutsche Wasser- und Schifffahrtsverwaltung einen Standard für 10 anstehende Projekte für kleinere Flüsse wie Havel und Lahn. Er wird aber auch in größeren Wehranlagen der Flüsse Main und Neckar eingesetzt. Wie zu erkennen ist, sind die Projekte in ganz Deutschland verbreitet.

Quellen

PIANC. (2018). Report of Working Group 166: Inflatable Structures in Hydraulic Engineering. PIANC, Brüssel.

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

Ein anwendungsorientiertes Modell für Schleusenfüllprozesse

von Fabian Belzner[1], Franz Simons[1] und Carsten Thorenz[1]

1. Einleitung

Mit einer Gesamtlänge von 7.300 km sind die deutschen Binnenwasserstraßen das größte Wasserstraßennetz Westeuropas. Die auf diesen Wasserwegen transportierten Gütermengen beliefen sich 2016 auf etwa 221 Millionen Tonnen bzw. 8 % des gesamten Güteraufkommens in Deutschland. Rund 400 Schleusen sind Teil des Wasserstraßennetzes und von zentraler Bedeutung für die Wasserstraßeninfrastruktur, da sie es der Schifffahrt ermöglichen, lokale Höhenunterschiede zu überwinden. Die Schleusen befinden sich an staugeregelten Flüssen, zwischen Kanalstrecken oder an Verbindungspunkten. Ihr sicherer und effizienter Betrieb ist eine Grundvoraussetzung für die Beförderung von Gütern auf den Wasserstraßen. Eine der Hauptaufgaben der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) besteht in der Unterstützung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes beim Entwurf und Bau solcher Schleusen. Idealerweise werden bei einem Minimum an Bau- und Unterhaltungsaufwand die Anforderungen einer kurzen Schleusungszeit und der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt gewährleistet.

Am Anfang der Planung steht der hydraulische Entwurf, bei dem Anforderungen hinsichtlich Bauwerksstruktur, Betrieb und Sicherheit zu berücksichtigen sind. Unter hydraulischen Gesichtspunkten muss ein Füllsystem gefunden werden, bei dem möglichst geringe Kräfte auf das Schiff wirken und gleichzeitig eine möglichst kurze Füllzeit gewährleistet ist. Veränderungen am Füllsystem oder an der Schützöffnungsgeschwindigkeit können die auf das Schiff wirkenden Kräfte stark beeinflussen und zum Reißen der Trossen führen. Ein Überblick über die hydraulischen und konstruktiven Anforderungen an Schiffsschleusen findet sich in Partenscky (1986) oder PIANC (2015).

Die auf ein Schiff wirkenden Kräfte können heute mit Hilfe von Naturmessungen, gegenständlichen oder numerischen Modellen ermittelt werden. Naturmessungen sind schwierig durchzuführen, da ein Schleusenprototyp und ein reales Schiff benötigt werden. Die Messtechnik muss hohen Kräften und Drücken, Strömungsgeschwindigkeiten und in einigen Fällen sehr niedrigen Temperaturen widerstehen. Außerdem muss während der Messung die Sicherheit von Schiff und Besatzung garantiert werden. Faktoren wie Verkehrsaufkommen oder Wetterbedingungen bestimmen oft die Länge der Messperiode. Häufig sind nur wenige Versuche möglich und die Messungen erfordern eine sorgfältige Planung, da sich die Messmethode während der Versuche nicht mehr ändern lässt. In ihren Ausführungen weisen Bousmar et al. (2017) auf die Bedeutung von Naturmessungen für die Diagnose bei bestehenden Schleusen hin, erwähnen aber auch die Schwierigkeiten, die mit solchen Messungen unter ungünstigen Bedingungen verbunden sind.

Beim Entwurf neuer Schleusen sind Messungen vor Ort nicht möglich, da in der Regel noch keine Prototypen existieren. Der klassische Ansatz zur Untersuchung und Optimierung in Planung befindlicher Schleusen besteht in der Durchführung von Versuchen an einem maßstäblichen gegenständlichen Modell. Eine Beschreibung solcher Versuche findet sich beispielsweise bei Thorenz und Anke (2013) oder Van der Ven et al. (2015). Maßstabsmodelle haben den Vorteil, dass sie in einer trockenen und beheizten Laborumgebung errichtet werden können und die Durchführung einer großen Anzahl Versuche innerhalb kurzer Zeit ermöglichen. Für den Bau der Modelle sind jedoch auch mindestens einige Monate zu veranschlagen; bei komplexen Schleusen kann die Dauer sogar mehr als ein Jahr betragen. Die Ergebnisse können durch Maßstabseffekte oder unerwünschte Interaktionen zwischen Modellphysik und Messtechnik beeinflusst werden. Darüber hinaus lassen sich nicht alle relevanten Effekte in einem maßstabgetreuen Modell reproduzieren. Das elastische Verhalten der Trossen wird zum Beispiel in gegenständlichen Modellen nicht reproduziert, da die Handhabung der Taue unter realen Bedingungen häufig unbekannt und schwer vorherzusagen ist. Dennoch sind gegenständliche Maßstabsmodelle aufgrund ihrer hohen Zuverlässigkeit und des umfassenden Erfahrungsschatzes die gängigste Methode, um die auf das Schiff wirkenden Kräfte zu bestimmen.

Mit der Zunahme der Rechenleistung in den vergangenen Jahren kam es auch bei der Entwicklung multidimensionaler numerischer Verfahren zu erheblichen Fortschritten (Thorenz 2009). Es ist heute möglich, hochauflösende dreidimensionale Simulationen von instationären hydromechanischen Phänomenen wie etwa der Füllung einer Schleuse durchzuführen. Zur Simulation des schwimmenden Schiffs stehen eine Vielzahl an Verfahren zur Verfügung, die jedoch ein hohes Maß an Knowhow und beträchtliche Rechenleistung erfordern. Für einen Schleusenfüllprozess mit schwimmendem Schiff, beweglichen Schützen etc. werden selbst mit einem Hochleistungscluster mehrere Tage Rechen-

1 Bundesanstalt für Wasserbau, fabian.belzner@baw.de

zeit für die Simulation benötigt. Der Ansatz ist daher noch nicht für die Simulation einer großen Zahl von Fällen geeignet. Eine numerische Auswertung des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen findet sich bei Thorenz (2010), einen Überblick über die numerischen Methoden zur Simulation des Schleusenfüllprozesses mit OpenFOAM® geben Thorenz et al. (2017).

Für die frühe Planungsphase, aber auch für die Bewertung kleinerer baulicher Änderungen in der endgültigen Planung sind beide Verfahren nicht geeignet. Der Zeitaufwand für gegenständliche oder numerische Modellversuche ist häufig zu groß. Aus diesem Grund sind vereinfachte Modelle von Interesse, in denen die wichtigsten hydraulischen Phänomene berücksichtigt werden und die eine logische Schätzung und kurzfristige Prognose der zu erwartenden Kräfte auf den Schiffskörper zusammen mit den Füllzeiten ermöglichen. Für die grundlegenden Phänomene stehen analytische Gleichungen zur Verfügung. Um eine bessere Approximation zu erreichen, sind komplexere Analysetools erforderlich. Die Füllung und Entleerung einer Schleusenkammer über ein Vorkopffüllsystem kann mit LOCKFILL analysiert werden (De Loor 2016). LOCKFILL basiert auf der Überlagerung der Lösungen für verschiedene Gleichungen, die das Strömungsfeld in der Schleusenkammer beschreiben und aus analytischen Überlegungen abgeleitet wurden.

Bisherige Erfahrungen haben gezeigt, dass die Wellenausbreitung in der Schleusenkammer einen wesentlichen Einfluss auf die Schiffskräfte hat. Es wird ein Analysetool auf Basis der eindimensionalen Saint-Venant-Gleichungen vorgestellt, welches es erlaubt, Schleusenfüllungen zu simulieren und damit Aussagen über die auf das Schiff wirkenden Kräfte aufgrund unterschiedlicher hydraulischer Bedingungen zu treffen. In diesem Beitrag werden zunächst die wichtigsten Aspekte der hydrodynamischen Prozesse bei der Schleusenfüllung erläutert. Im Anschluss folgt eine Beschreibung des numerischen Ansatzes des neuen eindimensionalen Schleusenmodells. Es werden auf Basis von Daten aus gegenständlichen Modellversuchen Ergebnisse einer Kalibrierung vorgestellt und Anwendungsgrenzen des Modells aufgezeigt. Den Abschluss bilden die Zusammenfassung und Schlussfolgerungen. Alle in diesem Beitrag verwendeten Symbole sind in Kapitel 7 aufgeführt und erläutert.

2. Hydrodynamische Prozesse bei der Schleusenfüllung

Während der Füllung einer Schleusenkammer mit Vorkopffüllsystem können unterschiedliche Prozesse beobachtet werden, die miteinander in Wechselwirkung stehen. Zu den wichtigsten Phänomenen, die Schiffslängskräfte verursachen, zählen:

- eine, durch die anfängliche Schützöffnung ausgelöste Schwallwelle,
- die Ausbreitung des Füllstrahls,
- ein Wasserspiegelgefälle aufgrund der Null-Geschwindigkeit-Randbedingung am Unterhaupt der Kammer,
- dynamische Effekte wie die Wellenausbreitung in der Kammer sowie
- Energiehöhenverluste infolge von Wandreibung oder Kontraktions-/Expansionsverlusten.

Alle Auswirkungen dieser Phänomene müssen bei der Einschätzung der beim Schleusenfüllprozess auf das Schiff wirkenden Kräfte berücksichtigt werden. Die auf das Schiff wirkenden Längskräfte sind auf zwei vorherrschende Mechanismen zurückzuführen: Die Schiffslängskraft infolge des Wasserspiegelgefälles und die aus dem Auftreffen des Füllstrahls auf das Schiff resultierende Kraft. Letzteres Phänomen sollte grundsätzlich vermieden werden. Eine weitere Beschreibung des Sachverhalts findet sich zum Beispiel in Vrijburcht (1991).

Der Zufluss in die Schleusenkammer Q [m³/s] zu einem beliebigen Zeitpunkt lässt sich als Funktion der Druckhöhe Δh [m], des Öffnungsquerschnitts $A_{\text{Schütz}}$ [m²] und eines zeitunabhängigen Zuflussbeiwerts μ [-], welcher die Geometrie des Kontrollquerschnitts berücksichtigt, ausdrücken. Der Zuflussbeiwert kann aus Fachliteratur, mit gegenständlichen Modellversuchen oder mit numerischen Modellen ermittelt werden. Für Tafelschütze liegt er typischerweise zwischen 0,6 und 1,0. Anmerkung: Δh ist die maximale Druckhöhe, das heißt bei einem eingestauten Füllsystem entspricht dies der Wasserspiegeldifferenz zwischen Oberwasser- und Kammerwasserstand. Bei nicht eingestauten Systemen reduziert sie sich auf die maximale Druckhöhe über dem Kontrollquerschnitt. Der Zufluss in die Schleusenkammer berechnet sich wie folgt:

$$Q = \mu \cdot A_{\text{Schütz}} \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} \tag{1}$$

Die Berechnung des Wasserspiegels für eine bekannte Kammerbruttofläche A_{Kammer} [m²] erfolgt auf Basis von:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q}{A_{\text{Kammer}}} \tag{2}$$

Zu Beginn des Schleusenfüllprozesses wird durch den Gradienten des Zuflussvolumenstroms eine erste Schwallwelle ausgelöst, die zu einem abwärts gerichteten Wasserspiegelgefälle führt. Das durch diesen ersten Schwall L_{Schwall} [-] verursachte Gefälle

ist dabei proportional zum Gradienten des Zuflussvolumenstroms:

$$I_{\text{Schwall}} = -\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t \cdot (W_{\text{Kammer}} \cdot h - A_{\text{Schiff}})} \qquad (3)$$

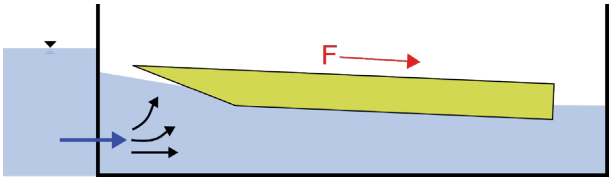
wobei W_{Kammer} [m] die Kammerbreite und A_{Schiff} [m²] die Schiffsquerschnittsfläche ist. Gemäß Gleichung (1) skaliert der Zufluss in die Schleusenkammer nahezu linear mit der Schütz-öffnungs¬geschwindigkeit. Dies bewirkt, dass das aus dem ersten Schwall resultierende Wasserspiegelgefälle ebenfalls linear mit der Schützöffnungsgeschwindigkeit skaliert. Bei Schleusen mit großen Hubhöhen und starker Energiedissipation am Oberhaupt kann die Kraft aus dieser Schwallwelle dominieren. Wird die anfängliche Schützöffnungsgeschwindigkeit zu Beginn des Füllprozesses für eine bestimmte Zeit verringert, kann diese Initialkraft minimiert werden. Da der Zufluss zu Beginn ohnehin gering ist, verlängert diese Reduktion der Schützöffnungsgeschwindigkeit zu diesem Zeitpunkt die Füllzeit kaum. Bild 1 (a) zeigt dieses Gefälle und die daraus resultierende zum Unterhaupt gerichtete Schiffslängskraft. Nach dem ersten Schwall entwickelt sich eine Geschwindigkeitsverteilung vom Oberhaupt zum Unterhaupt.

Bei „idealer“ Energiedissipation am Schleusenhaupt entspricht die mittlere Geschwindigkeit u_{mittel} [m/s] hinter dem Einlauf am Oberhaupt dem Zuflussvolumenstrom dividiert durch die zur Verfügung stehende Querschnittsfläche der Kammer:

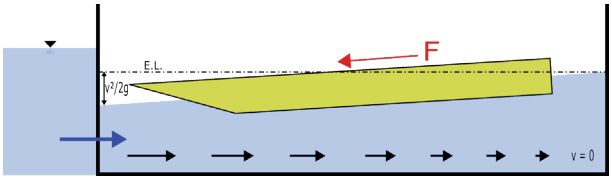
$$u_{\text{mittel}} = \frac{Q}{W_{\text{Kammer}} \cdot h - A_{\text{Schiff}}} \qquad (4)$$

Das Untertor der Schleusenkammer ist während des Füllprozesses geschlossen. Die Fließgeschwindigkeit am Kammerende beträgt daher Null. Unter Annahme einer konstanten Energiehöhe in der Kammer sowie einer vom Oberhaupt zum Unterhaupt linear abnehmenden Geschwindigkeitshöhe, wie in Bild 1 (b) illustriert, stellt sich ein zum Oberhaupt gerichtetes stationäres Wasserspiegelgefälle I_{stat} [-] zum Ausgleich der abnehmenden Geschwindigkeitshöhe ein. Dieses Gefälle ist somit von der mittleren Zuflussgeschwindigkeit u_{mittel} und der Länge der Schleusenkammer L_{Kammer} [m] abhängig und kann mittels Gleichung (5) errechnet werden.

$$I_{\text{stat}} = \frac{u_{\text{mittel}}^{\,2}}{2 \cdot \mathrm{g} \cdot L_{\text{Kammer}}} \qquad (5)$$



(a) Zum Unterhaupt gerichtetes Wasserspiegelgefälle aufgrund des ersten Schwalls



(b) Zum Oberhaupt gerichtetes Wasserspiegelgefälle aufgrund abnehmender Geschwindigkeit

Bild 1: Zeitliche Progression der Schiffskräfte während des Schleusenfüllprozesses

Bei einer Betrachtung der Längskräfte als Hangabtriebskräfte und unter Vernachlässigung des Füllstrahls in Schiffsnähe sowie anderer dynamischer Phänomene lassen sich die Schiffskräfte ausgehend vom Wasserspiegelgefälle um das Schiff grob abschätzen, indem die einzelnen Gefälle addiert und mit der Masse des Schiffes m_{Schiff} [kg] multipliziert werden:

$$F = (I_{\text{Schwall}}^{n} + I_{\text{stat}}^{n}) \cdot \mathrm{m}_{\text{Schiff}} \qquad (6)$$

Die Schwallwellen breiten sich in der Kammer aus und werden an beiden Enden reflektiert, sodass ein Schwappeffekt entsteht. Die Berechnung der Schleusungszeit T [s] erfolgt mittels der Gleichung für die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit im Flachwasser und der Geometrie von Kammer und Schiff:

$$T = 2 \cdot \left(\frac{L_{\text{Kammer}} - L_{\text{Schiff}}}{\sqrt{g \cdot h}} + \frac{L_{\text{Schiff}}}{\sqrt{g \cdot \left(h - \frac{A_{\text{Schiff}}}{W_{\text{Kammer}}}\right)}} \right) \qquad (7)$$

Eine erste Näherung für die während des Schleusenfüllprozesses auf das Schiff wirkenden Kräfte ist ohne größeren Aufwand mittels Gleichung (6) möglich. Wesentliche dynamische Effekte wie die Wellen-ausbreitung, der Einfluss des Füllstrahls, Reibungsverluste oder die zeitliche Entwicklung der Schiffskräfte werden in diesem vereinfachten Ansatz vernachlässigt. Dennoch ermöglicht er unter Zuhilfenahme eines Taschenrechners eine grobe Abschätzung der wirkenden Schiffslängskräfte innerhalb weniger Minuten. Es sei an dieser Stelle jedoch darauf hingewiesen, dass die hier vernachlässigten dynamischen Effekte einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse haben können. Ein vertiefter Ansatz ist daher wünschenswert.

3. Eindimensionales Schleusenmodell

3.1 Einleitung

Aufgrund der Defizite der vereinfachten analytischen Ansätze wurde für den Schleusenfüllprozess ein eindimensionales Modell implementiert. Dabei wurde von der Annahme ausgegangen, dass dieser Ansatz zielführender ist als die Anpassung der analytischen Approximationen an komplexere Situationen und die Superposition mehrerer Einflüsse. Das eindimensionale Modell bietet zudem Erweiterungsmöglichkeiten, z. B. die Kopplung an eindimensionale Rohrleitungsnetzmodelle, um komplexere Füllsysteme zu simulieren.

3.2 Grundlegende Gleichungen

Bei Füllung vom Oberhaupt her ist die Strömung in Kammerlängsrichtung die dominierende Größe und Geschwindigkeitsgradienten senkrecht dazu können vernachlässigt werden. Weitere Annahmen sind eine horizontale Wasseroberfläche, eine hydrostatische Druckverteilung sowie ein geringes Energieliniengefälle. Unter Vernachlässigung von Phänomenen, die zu lateralen Wasserspiegelneigungen und Kräften führen könnten, kann die Strömung in der Schleusenkammer mit den eindimensionalen (1D) Saint-Venant-Gleichungen beschrieben werden. Diese ermöglichen die Berechnung der Wassertiefe und einer mittleren Fließgeschwindigkeit an diskreten Querprofilen in der Kammer. Die 1D-Saint-Venant-Gleichungen sind ein System von zwei partiellen Differentialgleichungen zur Beschreibung der Masse- und Impulserhaltung in einem Gerinne. Die Herleitung und mehrere numerische Lösungsansätze dieser Gleichungen werden von Cunge et al. (1980) beschrieben. In einer konservativen Formulierung der 1D-Saint-Venant-Gleichungen werden die beiden Hauptvariablen Q [m³/s] und A [m²] verwendet (Jirka und Lang 2009):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \tag{8}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \beta \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{Q^2}{A}\right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot A \cdot (I_o - I_e - I_R) \tag{9}$$

I_0, I_e und I_R in Gleichung (9) stehen für das Sohlgefälle sowie die durch örtliche Kontraktions-/Expansionsverluste und Reibung bedingten Gefälle. Die Schiffslängskräfte lassen sich aus dem Wasserspiegelgefälle ableiten.

3.3 Betrachtung des Füllstrahls

Eine Voraussetzung für die Verwendung der 1D-Saint-Venant-Gleichungen ist die Annahme einer homogenen Geschwindigkeitsverteilung innerhalb der Querprofile. Tatsächlich kann sich aus Richtung des Obertors ein Füllstrahl ausbreiten, der aufgrund der hohen Geschwindigkeit innerhalb des Strahls und geringer Geschwindigkeiten in der angrenzenden Umgebung zu einer stark heterogenen Geschwindigkeitsverteilung führt (vgl. Bild 9). Die Proportionalität des lokalen Impulsflusses zum Quadrat der lokalen Geschwindigkeit bedeutet, dass die mittlere Fließgeschwindigkeit nicht mehr zur Berechnung der konvektiven Beschleunigung in Gleichung (9) verwendet werden kann. Dieses Problem wird in der Regel durch den Boussinesq-Koeffizienten β [-] korrigiert, welcher das Verhältnis von mittlerer Fließgeschwindigkeit ū [m/s] zur Summe der lokalen Fließgeschwindigkeiten im Strahl betrachtet. Im vorliegenden Beitrag wird eine diskretisierte Version betrachtet, wobei A [m²] für die gesamte Querschnittsfläche steht, die sich in K Flächen A_k [m²] mit den Geschwindigkeiten u_k [m/s] unterteilen lässt:

$$\beta = \frac{\sum_0^K u_k^2 \cdot A_k}{\bar{u}^2 \cdot A} \tag{10}$$

Unter Annahme von nur zwei Querschnittsflächen A (die gesamte Querschnittsfläche) und A_{Strahl} [m²] (die den Füllstrahl enthaltende Teilfläche von A), kann Gleichung (10) wie folgt vereinfacht werden:

$$\beta = \frac{A}{A_{\text{Strahl}}} \tag{11}$$

Das Gleichgewicht zwischen konvektiver Beschleunigung und dem Gradienten von h in Gleichung (9) für konstante Volumenströme führt zu einer Wasserspiegelabsenkung in Folge hoher, aus einem ausgeprägten Füllstrahl resultierender, β-Werte. Dieser Effekt ist auch in Laborversuchen bei Schleusen mit geringer Energiedissipation am Oberhaupt zu beobachten.

3.4 Betrachtung des Schiffs

Die Modellierung eines schwimmenden Schiffs in einem eindimensionalen hydrodynamischen Modell ist schwierig und erfordert eine komplizierte Lösung. Aus diesem Grund wurde hier ein vereinfachter Ansatz gewählt. Das in der Kammer schwimmende Schiff wird im Modell näherungsweise durch Reduktion der Querschnittsfläche im Bereich des Schiffs um die Schiffsquerschnittsfläche A_"Schiff" [m²] berücksichtigt. Dieser Schritt erfolgt zunächst für jedes Querprofil mittels Berechnung der benetzten Querschnittsfläche der Schleuse zu:

$$\mathrm{A} = \mathrm{h} \cdot W_{\text{Kammer}} - A_{\text{Schiff}} \tag{12}$$

Während der Modellierung werden die Wasserspiegelgradienten anhand der Querschnittsflächen berechnet. Da die Querschnittsfläche der Schleuse am Schiffsbug abnimmt und am Heck größer wird ohne dabei ein Wasserspiegelgefälle zu bewirken, ist eine Anpassung der Berechnung des räumlichen Gefälles von h gemäß Gleichung (9) um die Schiffsfläche erforderlich:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial (A + A_{\text{Schiff}})}{\partial x \cdot W_{\text{Kammer}}} \tag{13}$$

3.5 Diskretisierung

Da keine analytische Lösung für die 1D-Saint-Venant-Gleichungen existiert, wurde ein Finite-Differenzen-Ansatz für die räumliche und zeitliche Diskretisierung gewählt. Im Folgenden bezeichnet der Index i den jeweiligen Punkt im Raum, $i-1$ und $i+1$ sind die Gitterpunkte vor und hinter dem Punkt i (Bild 2). Mit dem Index n wird der aktuelle Zeitschritt bezeichnet, mit $n+1$ der nächste und mit $n-1$ der vorangegangene Zeitschritt. Δt ist die Länge eines Zeitschrittes und Δx ist der Abstand zwischen zwei Querprofilen. Für die räumliche Diskretisierung wurde ein versetztes Gitter gewählt. Die Berechnung der Querschnittsfläche $A_{\text{i+1/2}}$ erfolgt zwischen den beiden Querprofilen i und $i+1$, in denen die Zuflüsse Qi und $Q_{\text{i+1}}$ berechnet werden. Diese Vorgehensweise hat Vorteile in Bezug auf die Stabilität und ist mit der Finite-Volumen-Methode vergleichbar, bei der der Fluss an den Flächen jeder Zelle berechnet wird.

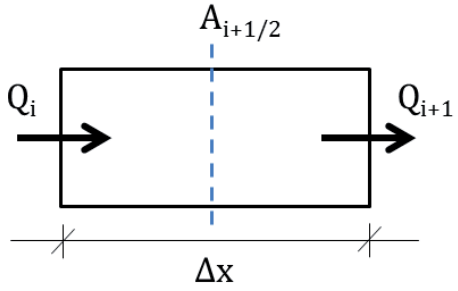


Bild 2: Ort der Berechnung von A und Q

Für die zeitliche Diskretisierung kommt das Crank-Nicolson-Verfahren zur Anwendung, um Genauigkeit 2. Ordnung- in der Zeit zu erhalten. Die Gradienten zwischen zwei Querprofilen können mit einem halben Zeitschritt berechnet werden oder um den Crank-Nicolson-Faktor θ [-] verschoben werden, wie in Gleichung (14) für die Querschnittsfläche und in Gleichung (15) für den Zufluss dargestellt:

$$A^{n+\theta} = (1-\theta) \cdot A^{n+1} - \theta \cdot A^{n} \tag{14}$$

$$Q^{n+\theta} = (1-\theta) \cdot Q^{n+1} - \theta \cdot Q^{n} \tag{15}$$

Für $\theta = 0$ werden die Gradienten explizit aus dem bekannten Zeitschritt berechnet, für $\theta = 1$ werden die Gradienten implizit am zukünftigen Zeitschritt berechnet und für $\theta = 0{,}5$ wird eine Genauigkeit 2. Ordnung in der Zeit erreicht. Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens findet sich in Crank et al. (1947).

Die Ableitungen aus der Kontinuitätsgleichung (8) wurden auf folgende Weise diskretisiert:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{A_{i+1/2}^{n+1} - A_{i+1/2}^{n}}{\Delta t} \tag{16}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_{i+1}^{n+\theta} - Q_{i}^{n+\theta}}{\Delta x} \tag{17}$$

Eine Diskretisierung der Gleichung (8) mit den Gleichungen (16) und (17) und ihre Lösung für die gewünschte Variable $A_{i+1/2}^{n+1}$ für den zukünftigen Zeitschritt $n+1$ führt zu (18):

$$A_{i+1/2}^{n+1} = A_{i+1/2}^{n} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot (Q_{i+1}^{n+\theta} - Q_{i}^{n+\theta}) + \Delta t \cdot q_i \tag{18}$$

Die Diskretisierung der Teile der Impulsgleichung (9) ist aufgrund der nichtlinearen Terme komplexer:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{Q_{i}^{n+1} - Q_{i}^{n}}{\Delta t} \tag{19}$$

$$\beta \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{Q^2}{A}\right) = \left(\beta_i \cdot \frac{Q_{i+1/2}^{n+\theta} \cdot Q_{i+1/2}^{n+\theta}}{A_{i+1/2}^{n+\theta}} - \beta_{i-1} \cdot \frac{Q_{i-1/2}^{n+\theta} \cdot Q_{i-1/2}^{n+\theta}}{A_{i-1/2}^{n+\theta}}\right) \cdot \frac{1}{\Delta x} \tag{20}$$

$$g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(A_{i+1/2}^{n+\theta} - A_{i-1/2}^{n+\theta}\right) \cdot \frac{(A + A_{\text{Schiff}})_{i+1/2}^{n+1} - (A + A_{\text{Schiff}})_{i-1/2}^{n+1}}{\Delta x \cdot W_{\text{Kammer}}} \tag{21}$$

$$g \cdot A \cdot (I_{\text{o}} - I_{\text{e}} - I_{\text{R}}) = g \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(A_{i+1/2}^{n+\theta} - A_{i-1/2}^{n+\theta}\right) \cdot (I_{\text{o}} - I_{\text{e}} - I_{\text{R}}) \tag{22}$$

Eine Diskretisierung der Gleichung (9) mit den Gleichungen (19), (20), (21) und (22) und ihre Lösung für die gewünschte Variable Q_i^{n+1} für den zukünftigen Zeitschritt $n+1$ führt zu Gleichung (23):

$$Q_i^{n+1} = Q_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x}\cdot\beta_i\cdot\frac{Q_{i+1/2}^{n+\theta}\cdot Q_{i+1/2}^{n+\theta}}{A_{i+1/2}^{n+\theta}} + \frac{\Delta t}{\Delta x}\cdot\beta_{i-1}\cdot\frac{Q_{i-1/2}^{n+\theta}\cdot Q_{i-1/2}^{n+\theta}}{A_{i-1/2}^{n+\theta}} - \Delta t\cdot g\cdot\frac{1}{2}\cdot\left(A_{i+1/2}^{n+\theta} - A_{i-1/2}^{n+\theta}\right) \cdot\frac{(A+A_{\text{Schiff}})_{i+1/2}^{n+1} - (A+A_{\text{Schiff}})_{i-1/2}^{n+1}}{\Delta x\cdot W_{\text{Kammer}}} + \Delta t\cdot g\cdot\frac{1}{2}\cdot\left(A_{i+1/2}^{n+\theta} - A_{i-1/2}^{n+\theta}\right)\cdot(I_e + I_R) \tag{23}$$

3.6 Randbedingungen

Als Randbedingung am Unterhaupt der Schleusenkammer wurde der Zufluss gleich Null gesetzt. Der Rechenkern erlaubt laterale Zuflüsse an jeder Stelle in der Schleusenkammer und auch den mit dem Zufluss transportierten Impuls zu spezifizieren. Die Zuflüsse wurden als Quellterme in der Kontinuitätsgleichung und der Impulsgleichung implementiert. Nachfolgend wird ein vereinfachtes Beispiel eines Vorkopffüllsystems betrachtet. In diesem Fall findet der Zufluss am ersten Knoten des Gitters statt. Der Zufluss wird nach Gleichung (1) berechnet, abhängig von der Wasserspiegeldifferenz Δh zwischen Oberwasser- und Kammerwasserstand, dem effektiven Öffnungsquerschnitt $A_{\text{Schütz}}$ und einem Zuflussbeiwert μ. Die Wasserspiegeldifferenz kann anhand des bekannten Wasserstands im Oberwasser und des Kammerwasserstands des vorhergehenden Zeitschritts berechnet werden. Der Schützöffnungsquerschnitt $A_{\text{Schütz}}$ ist als vorgegebene Funktion der Zeit ebenfalls bekannt. Mit dem Zuflussbeiwert μ wird die Leistung des Schützes abhängig von der Schützöffnung beschrieben. Sie kann im Vorfeld durch gegenständliche Modelle oder numerische Simulationen bestimmt werden oder es können Werte aus früheren Projekten mit ähnlicher Geometrie herangezogen werden, was allerdings die Unsicherheiten erhöht. Sofern Naturmessungen oder ein gegenständliches Modell einer Schleuse mit identischer Schützgeometrie zur Verfügung stehen, ist eine Bestimmung der Zuflussbeiwerte durch Vergleich der Wasserstände im zeitlichen Verlauf möglich.

3.7 Lösungsverfahren

Die Gleichungen (18) und (23) erlauben die Berechnung der Querschnittsfläche A und des Zuflusses Q für jedes Querprofil für den Zeitschritt $n+1$. Allerdings werden hierfür die Werte A und Q im Crank-Nicolson-Zeitschritt $\mathrm{n}+\theta$ benötigt, was zu einem impliziten Lösungsalgorithmus führen würde. Zur Vermeidung der Lösung eines nichtlinearen Gleichungssystems kam ein Prädiktor-Korrektor-Verfahren zum Einsatz. Am Anfang der ersten Prädiktor-Korrektor-Schleife werden die Werte für den zukünftigen Zeitschritt $\mathrm{n}+1/2$ durch das explizite Mehrschrittverfahren nach Adams-Bashforth vorhergesagt, wie in den folgenden Gleichungen (24) und (25) dargestellt:

$$Q^{n+\frac{1}{2}} = Q^n + \frac{Q^n - Q^{n-1}}{\Delta t}\cdot\frac{1}{2}\cdot\Delta t = 1{,}5\cdot Q^n - 0{,}5\cdot Q^{n-1} \tag{24}$$

$$A^{n+\frac{1}{2}} = A^n + \frac{A^n - A^{n-1}}{\Delta t}\cdot\frac{1}{2}\cdot\Delta t = 1{,}5\cdot A^n - 0{,}5\cdot A^{n-1} \tag{25}$$

Ausgehend von einem konstanten Gradienten wird mit dem Adam-Bashforth-Prädiktor der Wert eines zukünftigen Zeitschritts von dem bekannten Zeitschritt sowie dem Gradienten zwischen aktuellem und vorhergehendem Zeitschritt abgeleitet (Zhao und Zhang 2011). Als Ergebnis der Extrapolation auf $n+1/2$ wird ein Crank-Nicolson-Faktor von $\theta = 0{,}5$ für die erste Prognose verwendet. Mit $Q^{\mathrm{n}+1/2}$ aus Gleichung (24) wird die diskretisierte Kontinuitätsgleichung (18) zum ersten Mal gelöst. Das Ergebnis $A^{\mathrm{n}+1}$ wird mit der Crank-Nicolson-Gleichung (14) gewichtet. Die Ergebnisse $A^{\mathrm{n}+\theta}$ aus Gleichung (14) und $Q^{\mathrm{n}+1/2}$ aus Gleichung (24) werden verwendet, um die Impulsgleichung (23) für $Q^{\mathrm{n}+1}$ zu lösen, die mit Gleichung (15) gewichtet wird. Nach Ende der ersten Prädiktor-Schleife existieren $A^{\mathrm{n}+\theta}$ und $Q^{\mathrm{n}+\theta}$ und die Gleichungen (18) und (23) werden wieder gelöst, um $A^{\mathrm{n}+1}$ und $Q^{\mathrm{n}+1}$ in einer ersten Korrekturschleife zu korrigieren. Auf Grundlage der Ergebnisse kann mit den Gleichungen (14) und (15) ein besserer Wert für $A^{\mathrm{n}+\theta}$ und $Q^{\mathrm{n}+\theta}$ berechnet werden, was zu besseren Ergebnissen für $A^{\mathrm{n}+1}$ und $Q^{\mathrm{n}+1}$ in zusätzlichen Korrekturschleifen führt. Die Gleichungen (18) und (23) werden vollständig gelöst: explizit

für $\theta = 0$, implizit für $\theta = 1$. Für $\theta = 0{,}5$ wird eine Genauigkeit 2. Ordnung in der Zeit erreicht. Dieser implizite Ansatz liefert nach einigen Iterationen eine Lösung, ohne dass ein lineares Gleichungssystem gelöst werden muss. Der Algorithmus ist in Bild 3 zur Verdeutlichung schematisch dargestellt.

3.8 Softwareimplementierung

Auf Grundlage der vorgestellten numerischen Algorithmen wurde das Tool LoMo (Kurzform für „BAW Lock Model“) implementiert, das die Anwendung vereinfacht und die Ergebnisse grafisch aufbereitet. LoMo wird in der objektorientierten Programmiersprache Java entwickelt. Da Java Bytecode plattformunabhängig ist, können die Releases auf allen wichtigen Betriebssystemen ausgeführt werden.

Der Rechenkern von LoMo ist gemäß dem Entwurfsmuster Model-View-Control (Modell-Präsentation-Steuerung) strikt von der Benutzungsoberfläche getrennt (Gamma 2011). Die Benutzungsoberfläche (Bild 4) basiert auf der JavaFX-Bibliothek und kann mithilfe des Konzepts des Java Resource-Bundle internationalisiert werden (Oracle 2018a). Derzeit stehen Internationalisierungen in Englisch und Deutsch zur Verfügung. Case-Setups können mithilfe der JAXB-Bibliothek (Java Architecture for XML Binding) in XML-Dateien gespeichert und aus diesen ausgelesen werden (Oracle 2018b). Das Software-Design soll die Erweiterung um neue Füllmethoden vereinfachen.

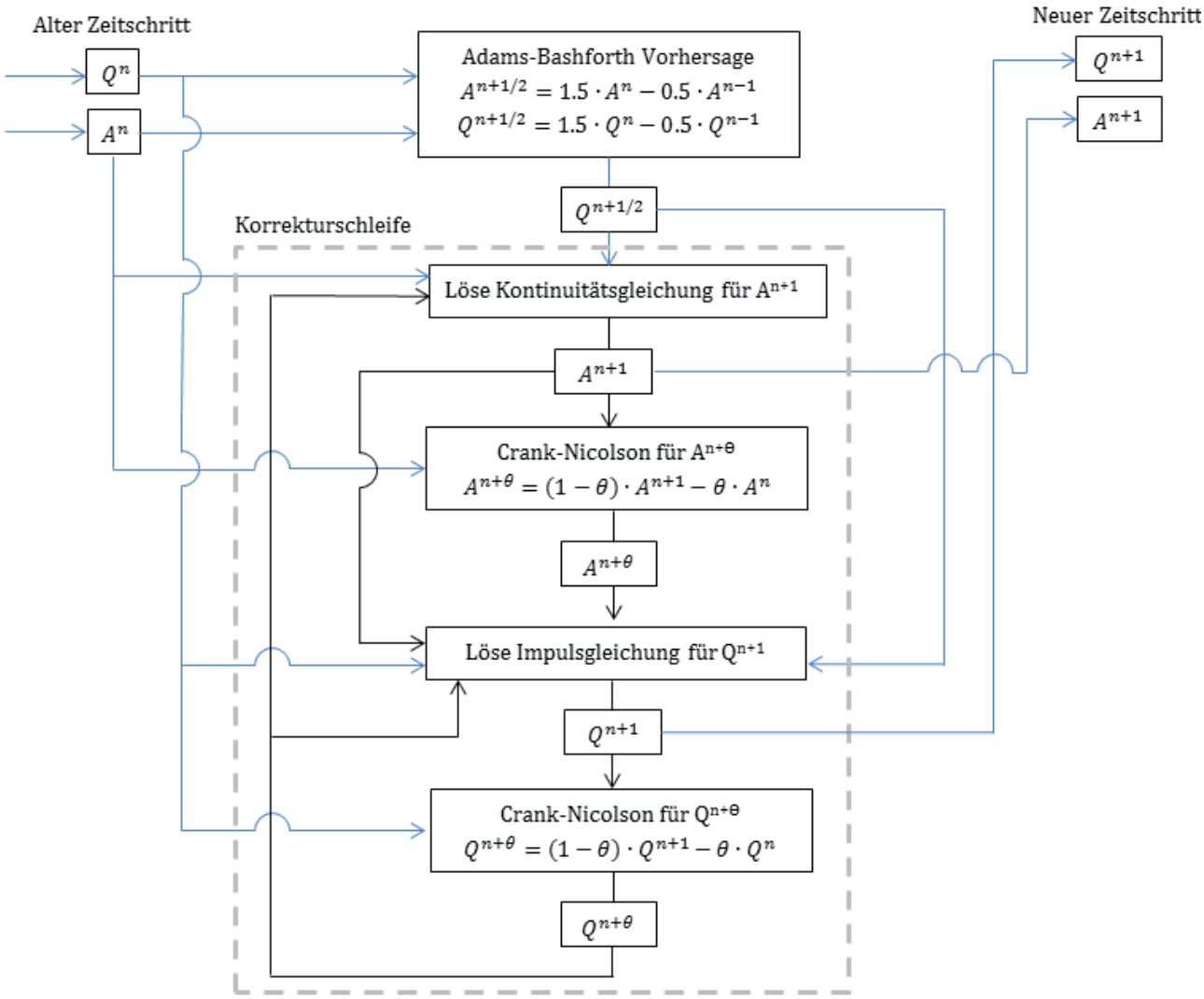


Bild 3: Prädiktor-Korrektor-Lösungsansatz

Die Open Access-Politik der Bundesregierung wird von der Bundesanstalt für Wasserbau aktiv unterstützt: Die BAW unterzeichnete 2016 die „Berliner Erklärung über den offenen Zugang zu wissenschaftlichem Wissen“(Max-Planck-Gesellschaft 2003) und gab eine eigene Open Access-Leitlinie heraus. Im Geiste dieser Leitlinie ist die Software frei verfügbar und unter der GNU General Public License 3 veröffentlicht (Free Software Foundation 2007). Der Quellcode und die Releases werden über GitHub zur Verfügung gestellt (https://github.com/baw-de/lomo). Interessierte sind eingeladen, die Software zu testen, sich an ihrer Entwicklung zu beteiligen und auf GitHub ihr Feedback zu geben. Es kann jedoch keine Gewährleistung für die Richtigkeit und Aussagekraft der Ergebnisse gegeben werden.

3.9. Modellaufbau und Kalibrierungsparameter

Der Modellaufbau erfolgt auf Basis der Abmessungen der Schleusenkammer und des Schiffs in der Kammer. Des Weiteren sind die Eigenschaften der Schütze und des Füllsystems zu wählen und eine Schützöffnungskurve muss definiert werden. Die Kalibrierung des Modells kann über den Vergleich der Ergebnisse mit Laborergebnissen, Ergebnissen aus dreidimensionalen numerischen Modellen oder von Naturversuchen erfolgen. Nachfolgend sind die beiden wichtigsten Kalibrierungsparameter genannt:

- die Leistungsfähigkeit des Füllsystems, welches sich auf die Füllzeit auswirkt. Hier erfolgt die Kalibrierung über den Zuflussbeiwert als Funktion der Schützöffnung.
- die Ausbreitung des Füllstrahls, der zur Folge hat, dass der Wasserstand im Bereich des Strahls sinkt und sich ein zum Oberhaupt gerichtetes Wasserspiegelgefälle einstellt.

Beide Parameter haben einen starken Einfluss auf die Schiffslängskräfte und müssen anhand von bekannten Ergebnissen kalibriert werden.

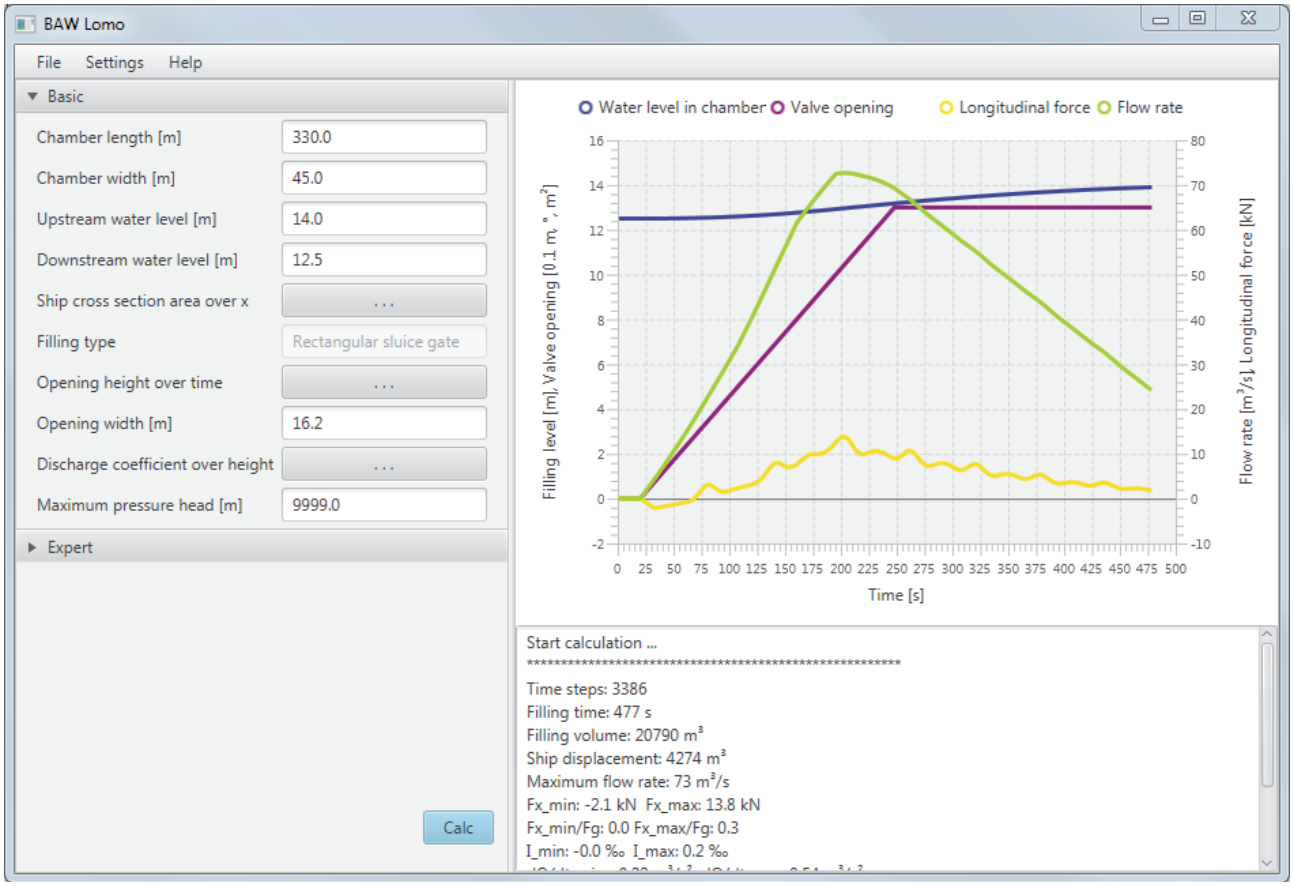


Bild 4: Benutzungsoberfläche

4. Vergleich mit Ergebnissen gegenständlicher Modelle

4.1 Einleitung

Zu Zwecken der Kalibrierung und Validierung wurden Ergebnisse von verschiedenen gegenständlichen Modellen der BAW verwendet. Im Folgenden wird ein ursprünglich für die Validierung von dreidimensionalen numerischen Verfahren erstelltes Modell vorgestellt. Das gegenständliche Modell wurde als stark vereinfachte Schleuse mit einem Tafelschütz und durchgehender Sohle zwischen dem oberen Vorhafen und der Schleusenkammer erstellt. Als Schiff wurde ein maßstäblich verkleinerter Schubleichter mit einer Länge von 3,01 m und einer Breite von 0,46 m genutzt. Die hydraulische Länge der Schleusenkammer betrug 6,32 m und ihre Breite 0,48 m. Als Fallhöhe waren 0,08 m vorgegeben. Die weiteren Abmessungen sind Bild 6 zu entnehmen. Der Wasserstand im Oberwasser wurde mithilfe eines Labyrinthwehrs konstant auf einer Höhe gehalten (Belzner et al. 2017). Zur Validierung und Kalibrierung des eindimensionalen Modells wurden verschiedene Versuche mit unterschiedlichen Schützöffnungsgeschwindigkeiten gefahren. Die während des Schleusenfüllprozesses auf das Schiff wirkenden Kräfte wurden durch Messung der Positionsänderung einer linearen Feder ermittelt. Zusätzlich wurden Schwimmpegel zur Messung des Wasserspiegels genutzt. Der Zuflussvolumenstrom wurde auf Basis der zeitlichen Variation des Wasserstands in der Schleusenkammer ermittelt. In Bild 5 ist eine Detailansicht des oberen Teils der Schleusenkammer mit dem Tor (links), dem Schiff und den Schwimmpegeln dargestellt. Eine weitere Beschreibung der Ermittlung der auf ein Schiff wirkenden Kräfte mit gegenständlichen Modellen findet sich in Thorenz und Anke (2013).

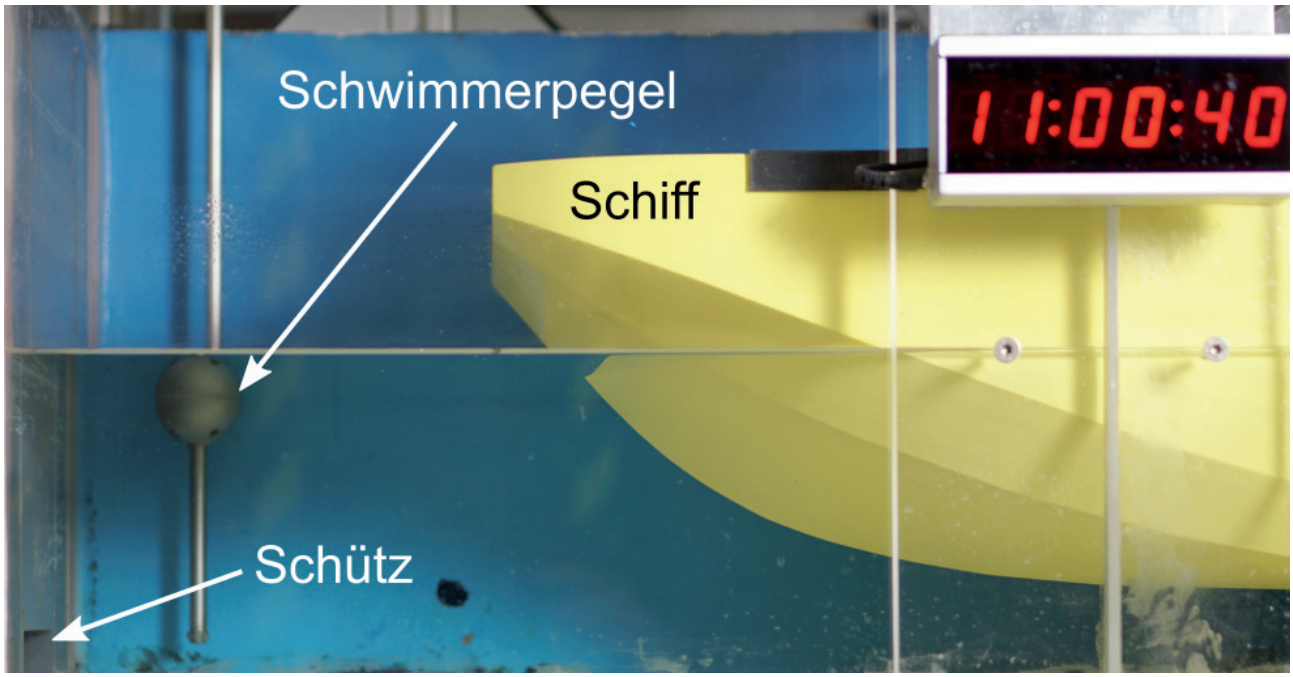


Bild 5: Foto des Oberhauptbereichs im gegenständlichen Modell

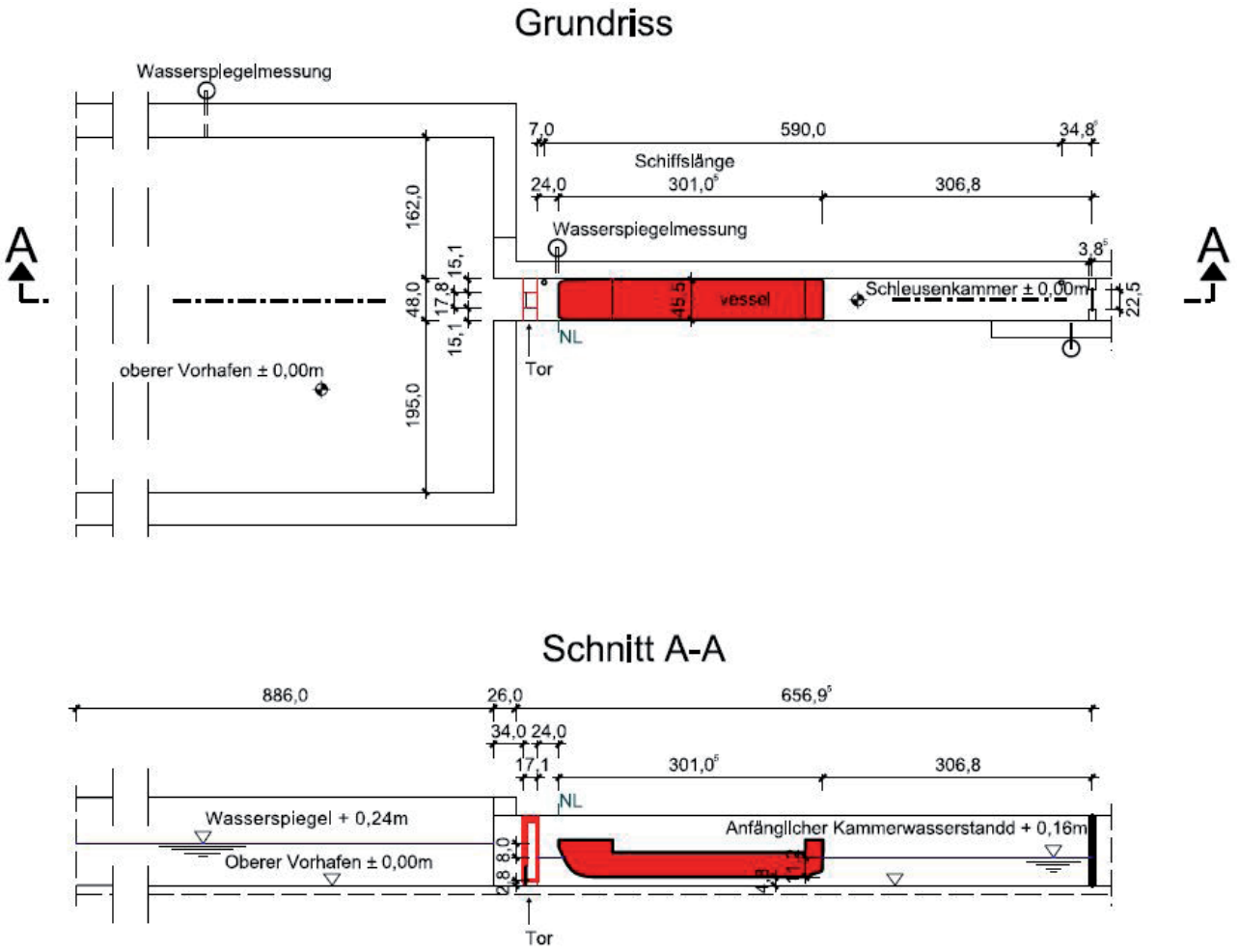


Bild 6: Plan des gegenständlichen Modells

4.2. Kalibrierung der hydraulischen Parameter des Füllsystems

Nachdem dem Programm die bekannten geometrischen Eigenschaften vorgegeben wurden, müssen die unbekannten hydraulischen Parameter kalibriert werden. Dies sind in erster Linie der Zuflussbeiwert in Abhängigkeit von der Öffnungsweite des Schützes und die Füllstrahl-Koeffizienten. In Bild 7 ist der Zuflussbeiwert abhängig von der Öffnungsweite eines typischen Tafelschützes dargestellt. Zur Bestimmung des Zuflussbeiwerts wurde der anhand der Ergebnisse eines gegenständlichen Modells berechnete Zufluss mit dem auf Basis des eindimensionalen Modells berechneten Zufluss verglichen. Dabei wurden dieselben geometrischen Randbedingungen sowie dieselbe Schützgeometrie und Öffnungsgeschwindigkeit zugrunde gelegt.

Bild 8 zeigt einen Fall, der zur Kalibrierung des Zuflussbeiwerts durch Vergleich der Ergebnisse des gegenständlichen Modells mit den im 1D-Modell berechneten Ergebnissen verwendet wurde. Die violette Kurve stellt die Öffnung des Schützes dar. Die Dauer des Schützöffnungsprozesses beträgt 390 s. Die rote und dunkelblaue Kurve zeigen die im Labormodell gemessenen beziehungsweise im eindimensionalen Modell berechneten Wasserstände. Für die Kalibrierung wurden die hellblaue und die grüne Kurve berücksichtigt, welche den Zufluss im gegenständlichen und im eindimensionalen Modell darstellen. Der von der Öffnungsposition des Schutzes abhängige Zuflussbeiwert wurde solange variiert, bis eine gute Übereinstimmung zwischen der hellblauen und der grünen Kurve für den Zufluss erreicht wurde.

Es ist zu beachten, dass Diskontinuitäten im Zuflussbeiwert oder in der Schützöffnungsgeschwindigkeit Wellenbewegungen in der Kammer auslösen können und daher vermieden werden müssen. Die auf das Schiff wirkenden Kräfte sind Hangabtriebskräfte, die auf Wellen reagieren. Diskontinuitäten im Zuflussbeiwert wirken sich somit unmittelbar auf die Schiffslängskräfte aus.

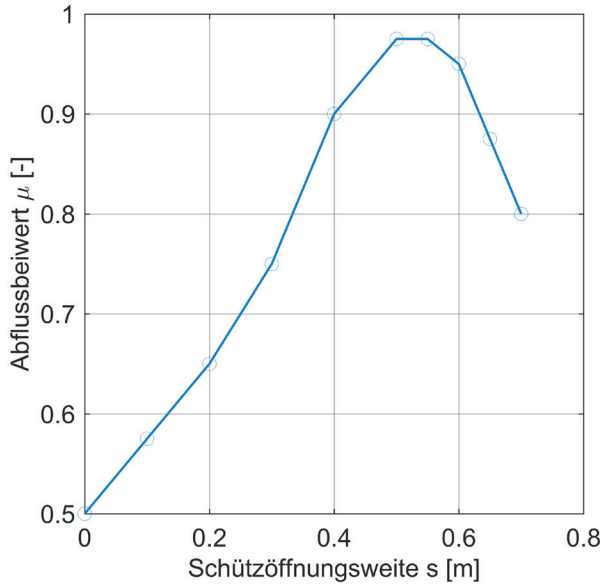


Bild 7: Zuflussbeiwert in Abhängigkeit von der Schützöffnung

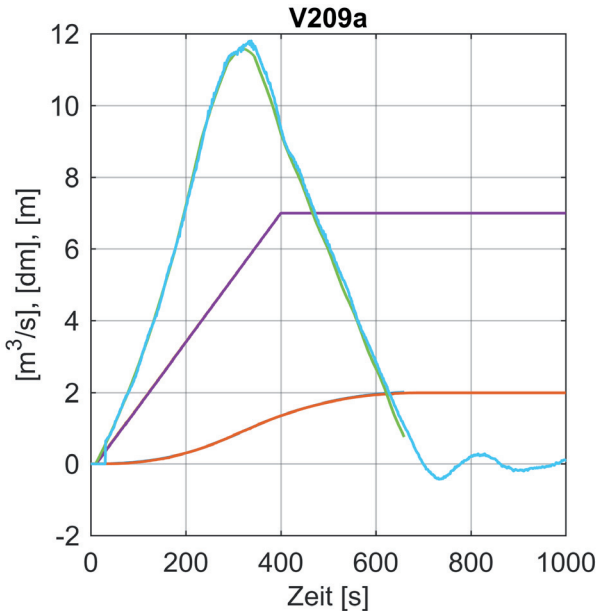


Bild 8: Kalibrierungsfall für Zuflussbeiwert des Schützes bei Schützöffnungsgeschwindigkeit von 1,8 mm/s

4.3 Ausbreitung des Füllstrahls

Gemäß Gleichung (11) ist der Wert β umgekehrt proportional zur Fläche des Füllstrahls in jedem Querprofil, was eine Beschreibung der Strahlausbreitung in Zeit und Raum erforderlich macht. Bild 9 zeigt das Obertor einer Schleuse mit Vorkopffüllsystem und eine mögliche Strahlausbreitung innerhalb der Schleusenkammer. Dieser Strahl resultiert aus einem im Verhältnis zur Kammerquerschnittsfläche kleinen Öffnungsquerschnitt des Schützes. Die Querschnittsfläche des Strahls ist mindestens so groß wie der Schützöffnungsquerschnitt, wächst mit zunehmender Entfernung vom Oberhaupt und kann nicht größer sein als die Querschnittsfläche der Kammer. Innerhalb dieser Grenzen muss die Ausbildung des Füllstrahls durch eine Funktion von Zeit und Raum beschrieben werden. Der Schützöffnungsquerschnitt und somit der anfängliche Strahlquerschnitt verändern sich mit der Zeit, da der Schützöffnungsprozess eine vorgegebene Funktion der Zeit ist. Die Querschnittsfläche des Strahls in der Kammer ist die Summe aus dem anfänglichen Strahlquerschnitt und dem Zuwachs abhängig von der Entfernung zum Schleusentor. Dieser Zuwachs lässt sich mit einem Linearkoeffizienten und einem Exponenten parametrisieren.

Die Ausbreitungsrate des Strahls wird in Gleichung (26) mit einem Linearkoeffizienten c_2 und einem Exponenten c_3 beschrieben. Der Gleichung liegt die Annahme zugrunde, dass der anfängliche Strahlquerschnitt am Oberhaupt abhängig vom momentanen Schützöffnungsquerschnitt $A_{\text{Schütz}}$ [m²] und den Koeffizienten c_0 und c_1 ist.

$$A_{\text{Strahl}} = c_0 + c_1 \cdot A_{\text{Schütz}}(t) + c_2 \cdot x^{c_3} \qquad (26)$$

Bei linearer Strahlausbreitung hat der Koeffizient c_3 einen Wert von Eins, bei quadratischer Ausbreitung hat c_3 einen Wert von Zwei. Für einen flach und bodennah verlaufenden Füllstrahl kann ein linearer Anstieg des Strahlquerschnitts über die Kammerlänge angenommen werden. Für einen freien runden Strahl kann von einem quadratischen Zuwachs ausgegangen werden. Die Beschreibung des Füllstrahls ist komplex und wird möglicherweise sich mit der Weiterentwicklung von LoMo weiter verbessert.

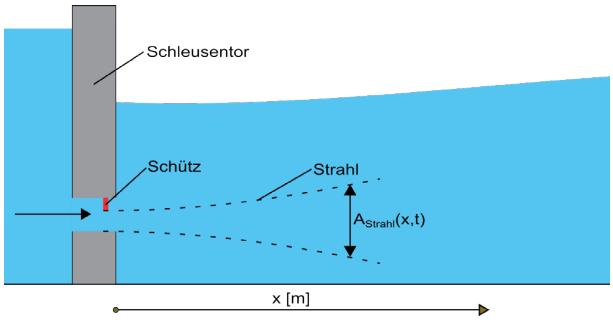


Bild 9: Ausbreitung des Füllstrahls, Definitionsskizze

Aufgrund der großen Abhängigkeit der auf das Schiff wirkenden Kräfte vom Verhältnis von Strahlquerschnitt zu Kammerquerschnitt ist eine gute Parametrisierung der Strahlausbreitung die Voraussetzung für richtige Ergebnisse. Voraussetzung für die Parametrisierung ist ein Vergleich der Kräfte, die an Prototypen oder bei Versuchen mit gegenständlichen Modellen beobachteten werden, mit den im eindimensionalen Modell ermittelten Kräften. Je dünner der Strahl ist, desto stärker ist das Wasserspiegelgefälle zum Oberhaupt hin und damit auch die zum Oberhaupt hin gerichteten Kräfte. Für die

Beschreibung des anfänglichen Strahlquerschnitts können die Koeffizienten c_0 und c_1 herangezogen werden. Entspricht dieser Querschnitt dem Schützöffnungsquerschnitt, kann für c_0 ein Wert von $c_0 = 0$ angenommen werden und für c_1 ein Wert von $c_1 = 1$. Für eine Beschreibung der Strahlausbreitung über die gesamte Strecke müssen die Koeffizienten c_2 und c_3 parametrisiert werden. Es sind folglich für die Kalibrierung mindestens zwei Versuche erforderlich: Ein Versuch, bei dem das Schiff nahe dem Oberhaupt liegt und ein zweiter mit größerem Abstand zum Oberhaupt. Die anhand des eindimensionalen Modells berechneten Kräfte müssen eine möglichst gute Übereinstimmung zu beiden Versuchen aufweisen. Bild 10 zeigt einen Vergleich der berechneten Kräfte mit den im Rahmen von Laborversuchen ermittelten Werten. In der linken Abbildung ist der Vergleich mit einem Versuch dargestellt, bei dem sich das Schiff nahe des Oberhaupts befand, die rechte Abbildung illustriert den Vergleich mit einem Versuch, bei dem das Schiff in der Mitte der Schleusenkammer lag.

4.4 Validierung mit Ergebnissen gegenständlicher Modelle

Nach Kalibrierung der hydraulischen Parameter für den Zufluss und die Strahlausbreitung wurde das Verhalten des Modells mittels zusätzlicher Modellläufe validiert. Für die Validierung wurde der Versuch mit den zuvor ermittelten Werten für den Zuflussbeiwert, aber mit einer geringeren Schützöffnungsgeschwindigkeit wiederholt. Hierbei wurde das Schütz in mehr als 800 s geöffnet. Die Ergebnisse sind in Bild 11 dargestellt. Sowohl für den steigenden als auch für den fallenden Ast der Zuflusskurve lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung erkennen.

Zur weiteren Validierung wurden die auf das Schiff wirkenden Kräfte bestimmt. Die Ergebnisse der Validierungsversuche sind in Bild 12 dargestellt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der berechneten Kräfte mit den im gegenständlichen Modell gemessenen Kräften. In der linken Abbildung ist der Vergleich mit einem Versuch dargestellt, bei dem sich das Schiff nahe des Oberhaupts befand, die rechte Abbildung zeigt den Vergleich mit einem Versuch, bei dem das Schiff in der Mitte der Schleusenkammer lag.

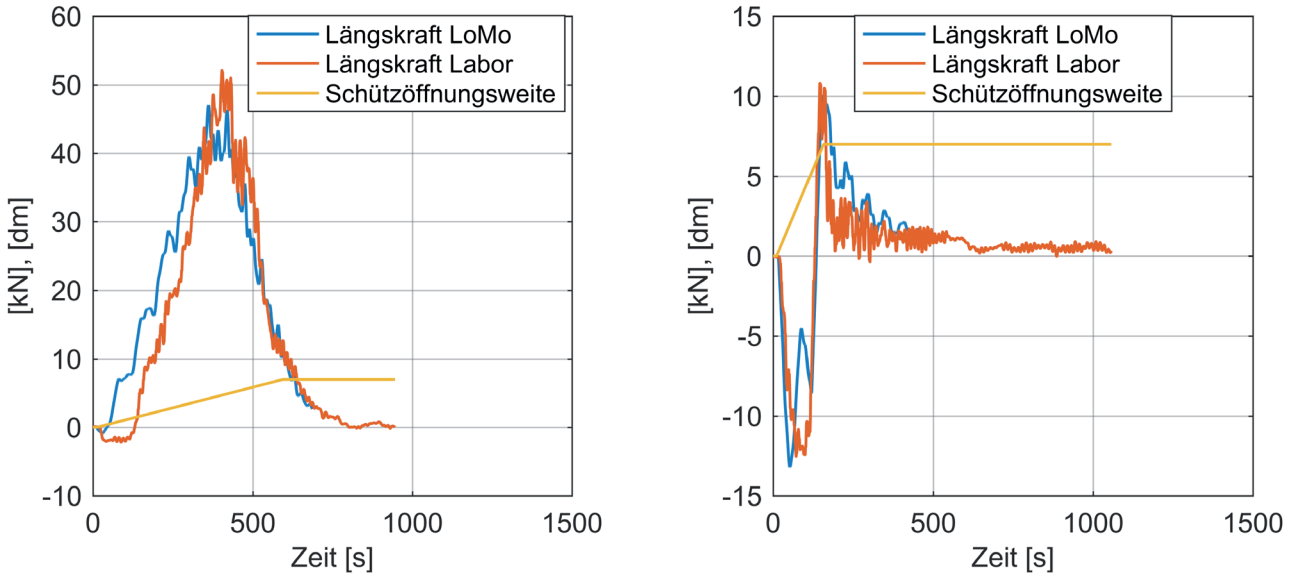


Bild 10: Kalibrierungsfall: Vergleich der gemessenen und simulierten Schiffskräfte für unterschiedliche Schiffspositionen und Schützöffnungsgeschwindigkeiten. Links: Position des Schiffes nahe Oberhaupt; rechts: Position des Schiffes in der Mitte der Kammer.

In Bild 12 (rechts) ist zu erkennen, dass die im numerischen Modell berechneten Kräfte oszillieren, während solche Oszillationen im gegenständlichen Modell nicht beobachtet werden. Dies könnte auf fehlende Dämpfungseffekte im numerischen Modell zurückzuführen sein. Darüber hinaus ist eine Lücke von wenigen Sekunden im ansteigenden Ast der Schiffskräfte Bild 12 (links) erkennbar, die auch in Bild 10 (links) zu sehen ist, wo die numerisch berechneten Kräfte früher eintreten als die in den gegenständlichen Modellversuchen ermittelten Kräfte, was aber zu vergleichbaren Maximalwerten führt. Eine Erklärung für das Auftreten dieser Lücke steht noch aus. Möglicherweise ist sie das Ergebnis einer nicht exakten anfänglichen Schützöffnung im gegenständlichen Modell. Allerdings zeigen die im eindimensionalen Modell berechneten Kräfte (siehe Bild 12) eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen des gegenständlichen Modellversuchs, insbesondere bei den Maximalwerten der Kräfte, welche für die spätere Bemessung relevant sind.

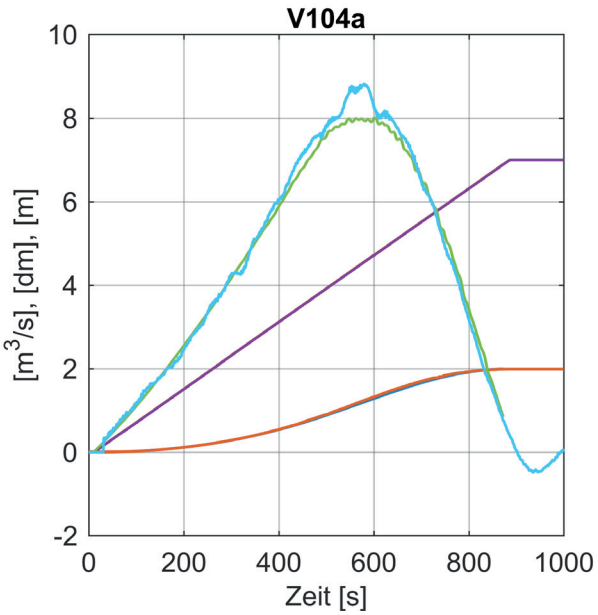


Bild 11: Validierungsfall für den Zuflussbeiwert des Schützes bei Schützöffnungsgeschwindigkeit von 0,8 mm/s

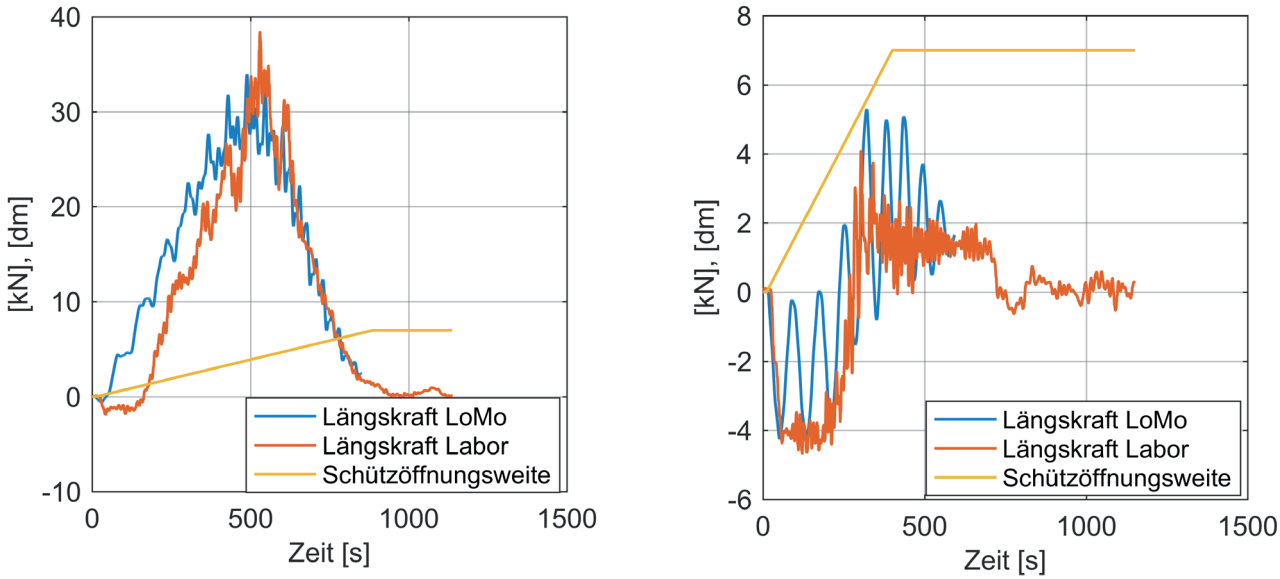


Bild 12: Validierungsfall: Vergleich der gemessenen und simulierten Schiffskräfte für unterschiedliche Schiffspositionen und Schützöffnungsgeschwindigkeiten. Links: Position des Schiffes nahe Oberhaupt; rechts: Position des Schiffes in der Mitte der Kammer.

4.5 Vorhersage der Schiffskräfte auf Grundlage von Erfahrungswerten

Für die weitere Validierung wurde das entwickelte Modell genutzt, um die auf ein Schiff wirkenden Kräfte für den Fall einer anderen Schleuse mit einem unterschiedlichen Füllsystem, anderen Abmessungen und einem anderen Schiff vorherzusagen. Ausgehend von den Erfahrungen aus früheren Versuchen erfolgte eine bestmögliche Schätzung der Kalibrierungsparameter ohne Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den Laborversuchen für diese Schleuse. Im Anschluss wurden der prognostizierte Zufluss im Zeitverlauf und die auf das Schiff wirkenden Kräfte mit den Ergebnissen aus den gegenständlichen Modellversuchen verglichen.

Die Genauigkeit der Vorhersage wurde anhand der Schleuse Bolzum geprüft. Die Schleuse verfügt über ein Vorkopffüllsystem. Als Füllorgan wird ein Drucksegmentobertor anstatt eines Tafelschützes verwendet. Die Breite der Schleuse beträgt 12,5 m, ihre hydraulische Länge 164 m. Das Schiff hat eine Länge von 105 m und einen Tiefgang von 2,80 m. Die Schleuse verfügt am Oberhaupt über eine Gitterwand zur Energiedissipation, sodass der Ein-

fluss des Füllstrahls vernachlässigbar ist. Die Berechnung des Zuflusses erfolgte mit der Gleichung (1), die Leistung des Segmenttors wird jedoch mit dem Term $A \cdot \mu$ [m²] ausgedrückt, abhängig vom Öffnungswinkel des Segments (Bild 13, links). Der Grund für diese Vorgehensweise ist, dass der Öffnungsquerschnitt eines Drehsegmenttors aufgrund seiner Form schwierig zu berechnen ist. Anstatt der Hubhöhe wird ein Segmentöffnungswinkel über die Zeit vorgegeben.

Die Abmessungen der Kammer und des Schiffs sowie die Wasserstände zu Beginn des Füllprozesses können als bekannt vorausgesetzt werden. Für die Leistungsfähigkeit des Obertors wurde die Korrelation zwischen Öffnungswinkel und $A \cdot \mu$ aus Bild 13 (links) übernommen. Der Wert wurde anhand eines dreidimensionalen numerischen Modells aus einem anderen Projekt mit geringfügig abweichender Geometrie des Segmenttors ermittelt. In der Simulation wurde das Segments innerhalb von 800 s von 0° auf 20° geöffnet. Der berechnete Zufluss und die auf das Schiff wirkenden Kräfte im Vergleich zu den im gegenständlichen Modellversuch ermittelten Ergebnissen sind Bild 13 (rechts) dargestellt. Der berechnete Zufluss zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Zuflusswerten des gegenständlichen Modells. Beim maximalen Zufluss ergibt sich eine Abweichung von etwa 5 %. Der Gradient des ansteigenden Zuflusses ist jedoch im gegenständlichen Modell etwas steiler, was auf eine Unterschätzung der Leistung des Drucksegementobertors im Bereich der geringen Öffnungswinkel hinweist. Im Vergleich der Schiffskräfte besteht eine qualitative Übereinstimmung zwischen beiden Kurven. Der Anfangsschwall zu Beginn der Füllung ist im gegenständlichen Modell deutlicher ausgeprägt, möglicherweise aufgrund einer plötzlichen Öffnung des Segmentverschlusses mit kleinen Öffnungswinkeln. In diesem Bereich ist das gegenständliche Modell nicht vollständig anwendbar. Dennoch konnte eine gute Übereinstimmung zwischen der Berechnung im eindimensionalen Modell und den Laborversuchen nachgewiesen werden.

Hinweis: Im untersuchten Fall erfolgte die Vorhersage für eine vergleichbare Schleusen- und Schiffsgröße. Versuche, die Schiffskräfte für eine weitaus größere Seeschleuse vorherzusagen schlugen fehl. Hier empfiehlt sich eine Basiskalibrierung mit einer anderen Seeschleuse mit vergleichbaren Abmessungen.

5. Anwendungsgrenzen des entwickelten Modells

Das eindimensionale Schleusenmodell basiert auf den 1D-Saint-Venant-Gleichungen. Eine der fundamentalen Voraussetzungen für die Anwendbarkeit dieser Gleichungen besteht in einer hauptsächlich eindimensionalen Strömung. Strömungen orthogonal zur Hauptfließrichtung werden in den Gleichungen vernachlässigt. Eine Strömung in lateraler Richtung kann Querkräfte auf das Schiff auslösen, die sich im eindimensionalen Modell nicht bestimmen lassen. Die im Modell ermittelten Schiffslängskräfte hängen von den folgenden vier Einflussgrößen ab:

- Geometrie
- Schützöffnungsgeschwindigkeit
- Zuflussbeiwert des Schützes
- Strahlausbreitung

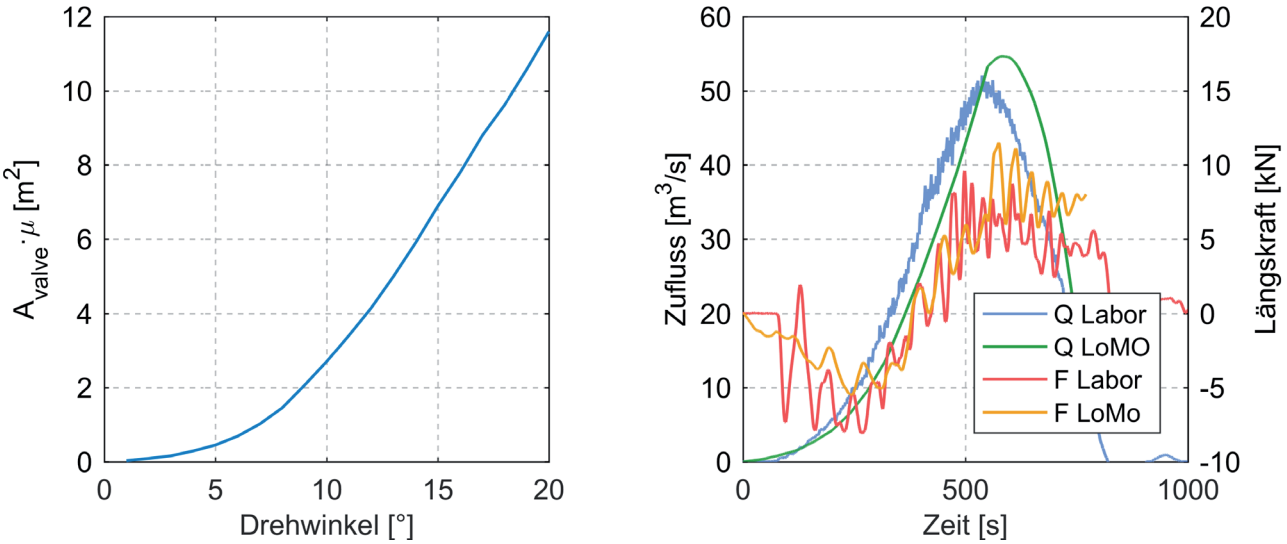


Bild 13: Links: Leistung des Segmenttors in Abhängigkeit vom Segmentöffnungswinkel; rechts: Vergleich des vorhergesagten Zuflussvolumenstroms und der Schiffslängskräfte aus dem eindimensionalen Modell mit den Ergebnissen des gegenständlichen Modells

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Geometrie der Schleuse und des Schiffs sowie die Schützöffnungsgeschwindigkeit bekannte Größen sind und dass diese korrekt in die Software eingegeben werden. Der Zuflussbeiwert des Schützes ist a priori nicht bekannt und muss in Versuchen ermittelt oder der einschlägigen Fachliteratur entnommen werden, woraus sich eine Unsicherheit bei Verwendung des Modells ergibt. Es kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, dass sich diese Effizienz auf den Prototyp übertragen lässt, da kleinere Anpassungen der baulichen Ausführung zu einem anderen hydraulische Verhalten des Systems führen können. Eine weitere Unsicherheit bei der Verwendung des Modells ergibt sich aus der Parametrisierung der Strahlausbreitung, welche großen Einfluss auf die Schiffskräfte hat. Die Ausbreitung des Füllstrahls kann mit gegenständlichen oder numerischen Modellen bestimmt werden. Dafür ist jedoch ein zusätzlicher Aufwand erforderlich. So sollten ein maßstabgetreues Modell oder Naturmessungen mit unterschiedlichen Schiffen oder Schiffspositionen zum Einsatz kommen, um eine geeignete Parametrisierung sicherzustellen. Da die Strahlausbreitung abhängig von der Größe, Ausbildung und Position des Schützes, Kanals und Tors ist, lassen sich bei fehlenden Informationen über vergleichbare Schleusen die geeigneten Strahlparameter nur schwer vorhersagen.

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Während des Schleusenfüllprozesses ist das Schiff in der Schleusenkammer Kräften ausgesetzt. Für die Bemessung des Füllsystems und die Spezifizierung der Schützöffnungsgeschwindigkeit ist es von größter Bedeutung, diese Kräfte richtig zu beurteilen. In diesem Beitrag werden die maßgeblichen hydraulischen Prozesse, welche diese Kräfte verursachen, am Beispiel eines Vorkopffüllsystems erläutert. Die vorhandenen Methoden zur Bestimmung der auf das Schiff wirkenden Kräfte werden diskutiert. Es wird ein eindimensionales Modell zur kurzfristigen Vorhersage der Längskräfte eingeführt und die Kalibrierungsparameter und ihre Auswirkungen werden behandelt. Die BAW verfolgt eine Open Data-Politik, die entwickelte Software einschließlich Quellcode ist somit als Open Source verfügbar.

Das Modell ermöglicht es dem Anwender, die während des Schleusenfüllprozesses auf das Schiff wirkenden Kräfte unter unterschiedlichen hydraulischen Randbedingungen in sehr kurzer Zeit zu berechnen. Steht ein gegenständliches Modell zur Durchführung von Kalibrierversuchen zur Verfügung, können die bei unterschiedlichen Schützöffnungsgeschwindigkeiten oder Schiffspositionen entstehenden Kräfte mit hoher Sicherheit vorhergesagt werden. Dies erlaubt Berechnungen auf der Basis von Daten eines gegenständlichen Modells, sogar wenn das Modell selbst nicht mehr existiert.

Die Extrapolation auf Schleusen mit anderen Geometrien und Füllsystemen ist mit deutlich größerer Unsicherheit behaftet, da die Kalibrierungsparameter geschätzt werden müssen. Hier ist die Erfahrung des Nutzers gefordert, denn eine schlechte Kalibrierung kann zur Unterschätzung der berechneten Kräfte führen. Eine funktionierende Energiedissipation am Oberhaupt verringert die auf das Schiff wirkenden Kräfte, da durch sie der Einfluss des Füllstrahls abnimmt. Darüber hinaus reduzieren sich dadurch auch die Unsicherheiten infolge einer schlechten Kalibrierung der Strahlausbreitung.

7. Nomenklatur

Δh	[m]	Wasserspiegeldifferenz zwischen Oberwasser- und Kammerwasserstand
μ	[-]	Zuflussbeiwert
Q	[m³·s^{-1}]	Volumenstrom
g	[m·s^{-2}]	Gravitationskonstante (g=9,81 m·s^{-2})
h	[m]	Wasserstand
A_{Kammer}	[m²]	Bruttofläche der Schleusenkammer
A_{Schiff}	[m²]	Schiffsquerschnittsfläche
W_{Kammer}	[m]	Kammerbreite
m_{Schiff}	[kg]	Masse des Schiffes
F	[N]	auf das Schiff wirkende Längskraft
A	[m²]	Gesamtquerschnittsfläche
β	[-]	Boussinesq-Koeffizient
q	[m^2·s^{-1}]	spezifischer Zufluss
L_{Schiff}	[m]	Schiffslänge
T	[s]	Wellenlaufzeit
n	[-]	Zeitschrittindex
$A_{\text{Schütz}}$	[m²]	Öffnungsquerschnitt
u	[m·s^{-1}]	Geschwindigkeit
L_{Kammer}	[m]	Kammerlänge
I	[-]	Gefälle
A_{Strahl}	[m²]	Querschnittsfläche des Füllstrahls
Δt	[s]	Zeitschrittlänge
Δx	[m]	Abstand zwischen zwei Querprofilen
θ	[-]	Crank-Nicolson-Faktor
B_{Schiff}	[m]	Schiffsbreite
i	[-]	Gitterindex
c_0, c_1, c_2, c_3	[-]	Parameter zur Beschreibung der Ausbreitung des Füllstrahls

8. Literaturverzeichnis

Belzner, F.; Merkel, J.; Gebhardt, M.; Thorenz, C. (2017): Piano Key and LabyrinthWeirs at German waterways: Recent and future research of the BAW. In: Sébastien Erpicum, Frédéric Laugier, Michael Pfister, Michel Pirotton, Guy-Michel Cicero und Anton J. Schleiss (Hg.): Labyrinth and Piano Key Weirs III: CRC Press/Balkema, S. 167–174.

Bousmar, Didier; Savary, Celine; Swartenbroekx, Catherine; Zorzon, Gil (2017): Feedback From 10 Years Of Field Measurement On Navigation Locks. In: Hydrolink Magazine, 1/2017, S. 10–13.

Crank, J.; Nicolson, P.; Hartree, D. R. (1947): A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type. In: Math. Proc. Camb. Phil. Soc. 43 (01), S. 50. DOI: 10.1017/S0305004100023197.

Cunge, Jean A.; Holly, Forrest M.; Verwey, Adri (1980): Practical aspects of computational river hydraulics. Boston u.a.: Pitman (Monographs and surveys in water resources engineering, 3).

De Loor, Alexander (2016): LOCKFILL. User & Technical Manual. Deltares. Delft. Online verfügbar unter http://oss.deltares.nl/documents/645319/645571/Lockfill+Manual, zuletzt geprüft am 07.03.2018.

Free Software Foundation (2007): GNU General Public License 3. Online verfügbar unter https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0, zuletzt geprüft am 09.03.2018.

Gamma, Erich (2011): Design patterns. Elements of reusable object-oriented software. 39. printing. Boston: Addison-Wesley (Addison-Wesley professional computing series).

Jirka, Gerhard H.; Lang, Cornelia (2009): Einführung in die Gerinnehydraulik.

Max-Planck-Gesellschaft (2003): Berlin Declaration on Open Access to Knowledge in the Sciences and Humanities. Unter Mitarbeit von Prof. Dr. Martin Stratmann. Hg. v. Max-Planck-Gesellschaft. München. Online verfügbar unter https://openaccess.mpg.de/67605/berlin_declaration_engl.pdf, zuletzt aktualisiert am 15.02.2018.

Oracle (2018a): Class ResourceBundle. Hg. v. Oarcle. Online verfügbar unter https://docs.oracle.com/javase/8/docs/api/java/util/ResourceBundle.html, zuletzt geprüft am 07.03.2018.

Oracle (2018b): JAXB. Java Architecture for XML Binding. Hg. v. GitHub. Online verfügbar unter https://javaee.github.io/jaxb-v2/, zuletzt geprüft am 09.03.2018.

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

PIANC (2015): PIANC InCom WG 155. Ship Behaviour in Locks and Lock Approaches. Unter Mitarbeit von Carsten Thorenz, Jeremy R. Augustin, Didier Bousmar, Jean-Pierre Dubbelman, Arcelio Hartley, Peter Hunter et al. Hg. v. PIANC.

Thorenz, Carsten (2009): Computational Fluid Dynamics in lock design. State of the art. PIANC INTERNATIONAL WORKSHOP "Innovation in Navigation Lock Design". PIANC. Brussels, Belgium, 2009.

Thorenz, Carsten (2010): Numerical evaluation of filling and emptying systems for the new Panama Canal locks. In: 32nd PIANC International Navigation Congress 2010. Liverpool, United Kingdom, 10 - 14 May 2010. Red Hook, NY: Curran.

Thorenz, Carsten; Anke, Jens (2013): Evaluation of ship forces for a through-the-gate filling system. Smart Rivers 2013. PIANC. Liege (BE), Maastricht (NL), 2013.

Thorenz, Carsten; Belzner, Fabian; Hartung, Torsten; Schulze, Lydia (2017): Numerische Methoden zur Simulation von Schleusenfüllprozessen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAW Mitteilungen 100. Kompetenz für die Wasserstraßen - Heute und in Zukunft. Forschungs- und Entwicklungsprojekte der BAW. Online verfügbar unter http://henry.baw.de/bitstream/20.500.11970/102493/1/mb_100_07_Thorenz_Numerische.pdf.

Van der Ven, P.; Van Velznen, G.; O'Mahoney, T.; De Loor, A. (2015): Comparison of Scale Model Measurements and 3D CFD Simulations of Loss Coefficients and Flow Patterns for Lock Levelling Systems. In: PIANC (Hg.): 7th International PIANC-SMART Rivers Conference. Unter Mitarbeit von Lucía Torija. Buenos Aires, Argentinia.

Vrijburcht, A. (1991): Forces on ships in a navigation lock induced by stratified flows, Stellingen.

Zhao, Bin; Zhang, Bo (2011): Comparison of different order Adams-Bashforth methods in an atmospheric general circulation model. In: Acta Meteorologica Sinica 25 (6), S. 754–764. DOI: 10.1007/s13351-011-0606-6.

Verfasser

Fabian Belzner M.Eng., Dipl.-Ing. Franz Simons,
Dr.-Ing. Carsten Thorenz
Bundesanstalt für Wasserbau
Kussmaulstr. 17
76187 Karlsruhe
fabian.belzner@baw.de
Tel.: 0721 9726-2220

5. Schleusenkammer in Brunsbüttel

von Dr. Matthias Schäfers[1] und Frank Allgäuer[2]

1. Allgemeines

Die 5. Schleusenkammer in Brunsbüttel (kurz: 5SKB) befindet sich am nordseeseitigen Eingang des Nord-Ostsee-Kanals. Der Kanal spielt aus verkehrlicher Sicht eine große Rolle für den Ostseeraum sowie die Nordseehäfen (Brunsbüttel, August 2016). Dabei handelt es sich, gemessen an der Zahl der querenden Schiffe, um die verkehrsreichste künstliche Wasserstraße der Welt. Aufgrund der Verkehrsströme von den Nordseehäfen zur Ostsee kommt der Schleuse auch besondere wirtschaftliche Bedeutung zu.

Aktuell hat die Schleusenanlage in Brunsbüttel 4 Schleusenkammern. Zunächst waren zwei Schleusenkammern mit je 24 m breiten Stemmtoren gebaut worden, die jedoch schnell um zwei weitere Schleusenkammern mit jeweils 46 m breiten Schiebetoren ergänzt wurden (tatsächlich nutzbare Breite: 42 m). Seit ihrem Bau (1914) sind diese Schleusen nicht mehr grundinstandgesetzt worden. Aufgrund der starken Auslastung und dem umfassenden Bedarf an Wartungs- und Reparaturarbeiten ist es nicht möglich, die vorhandenen Schleusen während des Normalbetriebs zu sanieren. Aus diesem Grund muss eine zusätzliche Schleusenkammer für die Zeit der Grundinstandsetzung zur Verfügung gestellt werden, um die vorhandenen Kapazitäten aufrechtzuerhalten. Dies macht den Bau einer 5. Schleusenkammer notwendig. Nach der Grundinstandsetzung der vorhandenen Schleusenkammern wird die Schleusenkapazität im Vergleich zum aktuellen Stand größer sein. Die Maße der neuen Schleusenkammer wurden an die beiden vorhandenen großen Schleusen angepasst.

Neben der Funktion als Schleusenkammer ist die Bauweise auch wegen des Hochwasserschutzes sowie der Trockenlegung der Schleuse eine Herausforderung. Die Bauweise ist von diesen beiden, teils widersprüchlichen, teils sich ergänzenden Anforderungen geprägt.

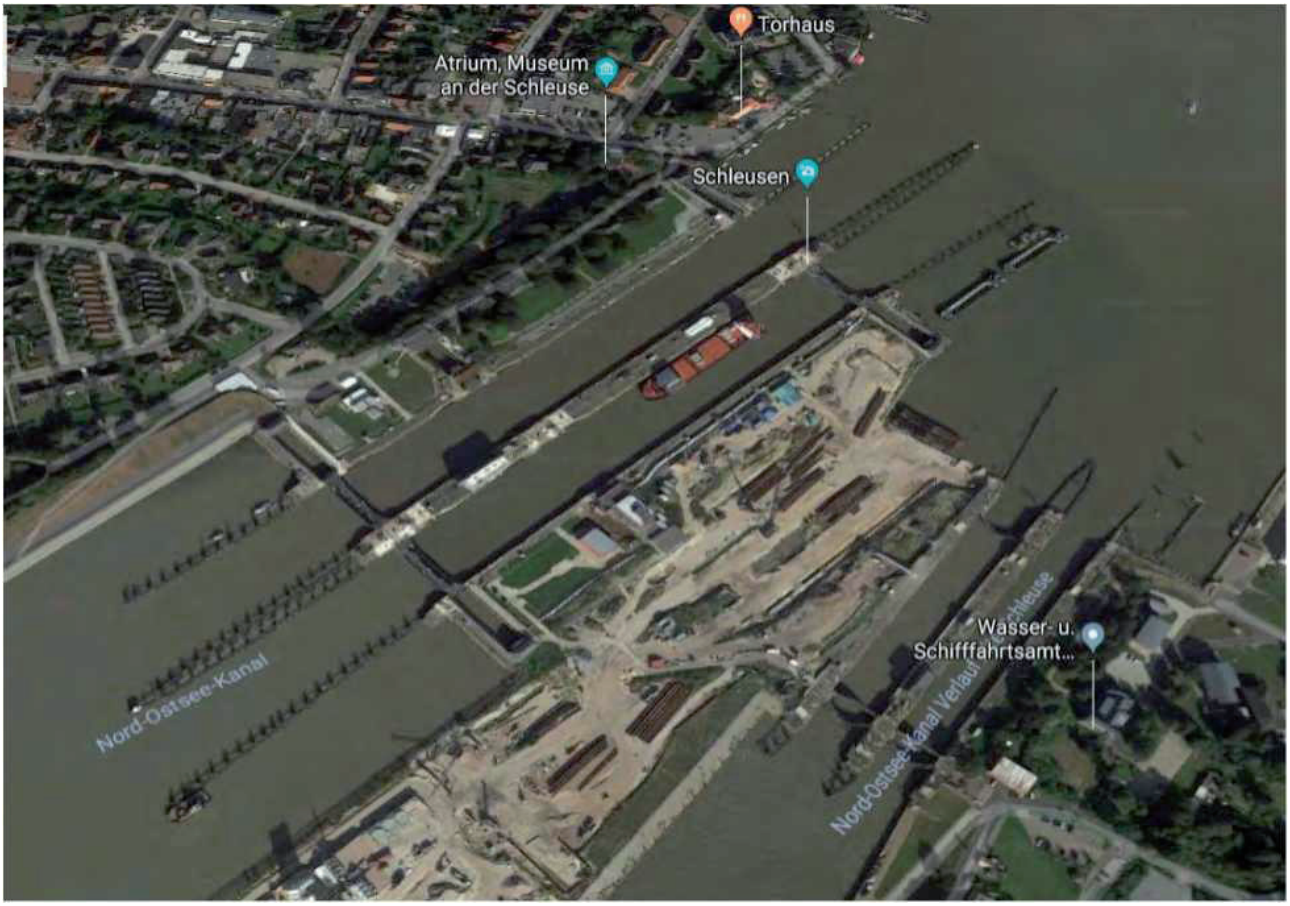


Abbildung 1-1 Blick auf Brunsbüttel (Quelle: Google Maps)

1 Dr. Matthias Schafers, IRS Stahlwasserbau Consulting AG, Deutschland
2 Frank Allgauer, IRS Stahlwasserbau Consulting AG, Deutschland

In Anbetracht der benötigten Schleusenverfügbarkeit und der relativ großen Anzahl paralleler Schleusen mit gleichen Maßen konnte die Reaktionszeit so gewählt werden, dass kein zweites Tor konstant an jedem Schleusenhaupt betriebsbereit sein muss. Dies wird die Investitionskosten senken. Nur Lagerbereiche müssen für die gewählte Anzahl der Ersatztore zur Verfügung stehen. Zudem wird aktuell der Bau eines Trockendocks geplant. An die Fahrsysteme und die Toroberwagen werden ähnliche Redundanzanforderungen gestellt wie an die Tore, mit denen dem Ausfall einer Schleusenkammer vorgebeugt wird.

Aufgrund dieser unterschiedlichen Anforderungen sind Seeschleusen sehr komplex in ihrer Bauweise. Kernelement dieser Systeme und sogar noch komplexer sind die Schleusentore mit Ballast-/ und Lenzsystemen, die großen Einfluss auf die Gesamtfunktion der Schleuse haben. In diesem Fall haben die Schleusen ein integriertes Ballastsystem. Es handelt sich um ein Bauwerk aus den Bereichen Ingenieur- und Maschinenbau sowie Schiffbau.

Brunsbüttel liegt an der Mündung der Elbe zur Nordsee, am westlichen Ende des Nord-Ostsee-Kanals. In diesem Bereich der Elbe herrschen starke Gezeiten, einschließlich einer hohen Belastung durch Schlick. Die Schleuse liegt auf einer Schleuseninsel am Eingang zum Nord-Ostsee-Kanal. Der Platz auf dieser Insel ist sehr begrenzt; die Lage der Schleuse und vor allem der querlaufenden Ausdehnung aller Bauteile, einschließlich der Antriebe, musste optimiert werden.

In diesem Artikel kann nur auf einige der Herausforderungen im Zusammenhang mit dieser Art von Schleusentoren eingegangen werden.

2. Auswahl des Entwurfs

Für die 5SKB wurden Schiebetore gewählt, die nach der Grundinstandsetzung der vorhandenen Schleusenkammern in der großen Schleuse auch dort verwendet werden können. Deshalb wurde das bereits in den vorhandenen Schleusen verwendete Schubkarrensystem gewählt. Ein Torunterwagen sowie ein Toroberwagen wurden für das Schiebetor entworfen. Es müssen also nur ein Torunter- und -oberwagen, mit dem gleichen Verbindungssystem und einem Schienensystem wie für die neue Schleusenkammer auch für die alte Schleuse gebaut werden, damit die Tore nach der Instandsetzung problemlos auch in den alten Schleusenkammern verwendet werden können. So kann auf Ersatztore verzichtet und die Instandhaltung standardisiert werden. Die Investitionskosten für zusätzliche Torkammern und Antriebe können dementsprechend gespart werden.

Die Tore der 5SKB wurden in schwimmender Bauweise entworfen. Ein Grund dafür ist ein vereinfachter Austausch der Schiebetore. Für den Zusammen-/ und Abbau werden die Tore mit dem bereits erwähnten Ballast-/ und Lenzsystem zum Schwimmen gebracht. Grundvoraussetzung für den Zusammenbau (und den Ausbau) der Tore ist ein ausreichendes Aufschwimmen der Unterseite der Tore, sodass diese über den Unterwagen geschwenkt

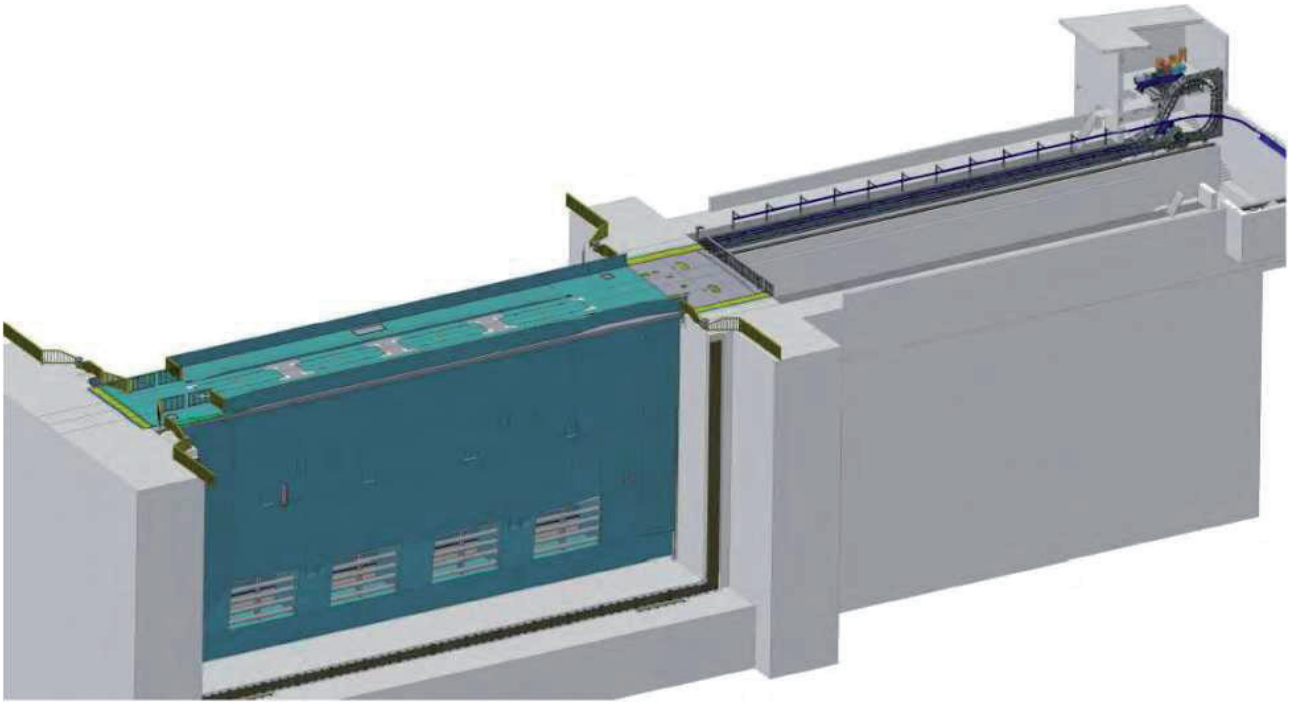


Abbildung 2-1 Darstellung eines geschlossenen Schiebetors

werden können (Nutzen der Ballastfunktion sowie der Gezeiten) und eine rotierende Schwenkbewegung um die Torkammer durchgeführt wird. Berücksichtigt man die Toleranzen bei der Herstellung von Stahl- und Betonbauten sowie die zulässigen Krängungs- und Trimmwerte, so sind einige Zentimeter Platz ausreichend, um die Tore einzusetzen.

Die Tore werden nur von Schleppern, wie oben beschrieben, bewegt, sodass sie mit geringen Kosten eingebaut werden können, ohne Spezialkräne nutzen zu müssen. Das Ersatztor verbleibt bis zum nächsten Einsatz auf Dalben. Für die Grundinstandsetzung bietet sich ein Trockendock an, da es mehr Platz als die Torkammern bietet und alle notwendigen Geräte zur Verfügung stehen, um die Wartung und Reparatur deutlich zu vereinfachen. Die Tore können mit den Schleppern leicht von einem Ort zum anderen gebracht werden. Aufgrund der Mobilität der Tore kann eine zweite Torkammer vermieden werden.

Wegen der Gesamtheit der Anforderungen an die Tore sind die neuen Tore schwerer als früher. Im Gegensatz zu den Bestandstoren der Brunsbütteler Schleuse werden die neuen Tore mit Füllungs- und Entleerungsschützen ausgerüstet, was sie schwerer macht. Durch Füllschütze im Tor kann die Wartung vollkommen unabhängig vom Schleusenbetrieb erfolgen (z. B. in einem Trockendock).

3. Belastung

Das Tor ist unterschiedlichen Einflüssen ausgesetzt, die weitestgehend in DIN 19704 zusammengetragen sind. Wichtig sind hier vor allem Eigengewicht, äußerer Wasserdruck, Ballastwasser, aber auch Verkehrslast auf den Fahrweg. Im Folgenden werden nur einige Besonderheiten der Belastung für die Schiebetore erläutert.

3.1 Ermüdung

In der 5SKB sollen 17 Doppelschleusenvorgänge pro Tag möglich sein. Der Doppelschleusenvorgang wird in Abbildung 3-1 dargestellt.

Die Nordsee ist stark von Gezeiten geprägt. Der Nord-Ostsee-Kanal hat einen gleichbleibenden Wasserstand von etwa ± 0,00 m über dem Meeresspiegel. Der Tidenhub der Nordsee liegt bei ± 3,00 m. Das Tor wird bei etwa gleichbleibenden Wasserständen im Kanal und bei schwankenden Wasserständen in der Nordsee bewegt. Der Wasserstand in der Schleusenkammer wird mit jedem Schleusenvorgang an den Wasserstand in der Nordsee oder im Nord-Ostsee-Kanal angepasst. Das Außenhaupt ist immer dem Wasserdruck ausgesetzt, der sich mit den Gezeiten einstellt. Im Nord-Ostsee-Kanal ist der Wasserstand annähernd konstant. In den Schleusenkammern ändert sich der Wasserstand mit jedem Schleusenvorgang von dem einen zum anderen Wasserstand. Die Tore können nur geöffnet oder geschlossen werden, wenn der Wasserstand am zu bewegenden Tor etwa ausgeglichen ist.

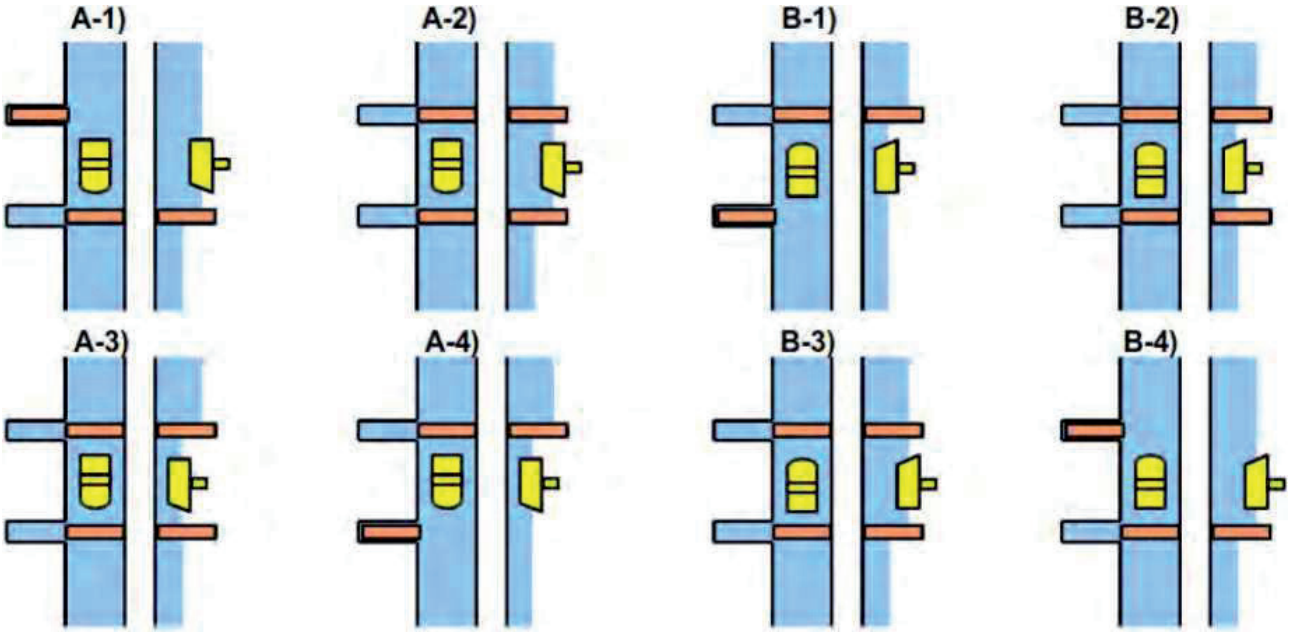


Abbildung 3-1: Definition eines Doppelschleusenvorgangs (A - Schleusenvorgang vom Nord-Ostsee-Kanal zur Elbe; B - Schleusenvorgang von der Elbe zum Nord-Ostsee-Kanal)

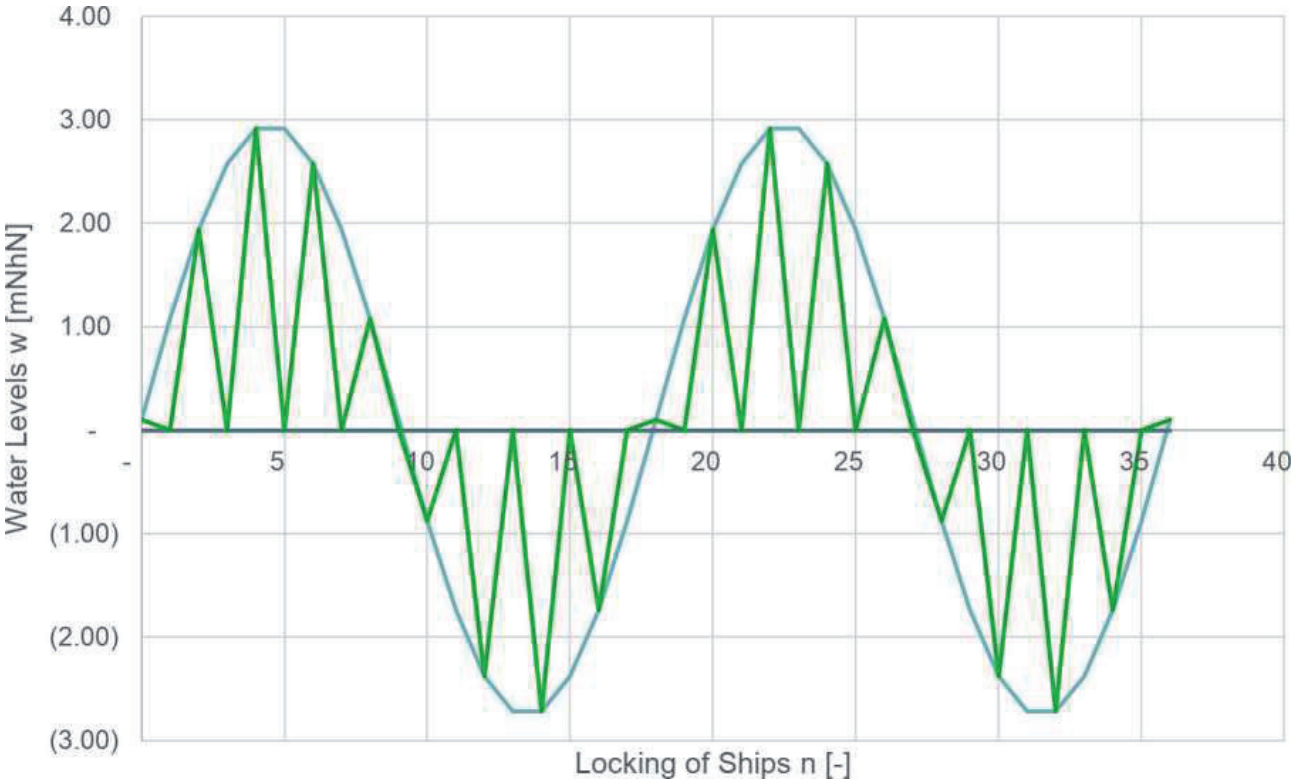


Abbildung 3-2: Darstellung der Gezeitenabfolge über einen Tag (17 Doppelschleusenvorgänge)

Abbildung 3-2 zeigt die Gezeitenfolge während eines Tages. Die Gezeitenfolge wurde näherungsweise mit einer Sinuskurve beschrieben, was für die Zwecke dieser Untersuchung ausreichend genau ist. Es wird angenommen, dass die Gezeitenfolge mit der Länge eines Tages übereinstimmt. Diese Vereinfachung hat nur geringe Auswirkungen auf das Untersuchungsergebnis, macht die Ergebnisse jedoch leicht konservativer.

Die Wasserstandsänderungen, die horizontal auf das Tor einwirken, verhalten sich affin zur Gezeitenfolge. Dies führt zu Ermüdungsbelastungen für die Tore durch die täglichen Gezeitenfolgen und die unterschiedlichen Lastzustände durch das Öffnen und Schließen der Tore bestimmt sind. Die Annahme, dass der größte Lastunterschied die Ermüdungsbelastung darstellt, führt zu unwirtschaftlichen Ergebnissen. Es wäre auch unwirtschaftlich, alle Wasserstandsunterschiede einzeln zu berechnen, sie an allen relevanten Stellen auszuwerten und sie im Entwurf zu optimieren. Dies würde den Entwurfsprozess deutlich verlängern. Auch die Auswertung des Mittelwerts wäre nicht sicher, da laut Wöhler hohe Belastungen zu überproportional hohem Schaden führen. Um jedoch einen reduzierten schadensäquivalenten und dennoch konservativen Wasserstand als Eingangswert zur FE-Berechnung zu berechnen, kann die Schadenshypothese nach Palmgreen-Miner ausgewertet werden (DIN-EN-1993-1-9:, 2005).

$$D = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} \tag{1}$$

Die gegebenen Lastunterschiede n resultieren aus der Häufigkeit der Schleusungen. Die Schleusenvorgänge an der 5SKB sind gleichmäßig über den Tag verteilt und größtenteils unabhängig von den Gezeiten. Somit treten beispielsweise keine Effekte dadurch auf, dass Schleusenvorgänge nur bei hohem Wasserstand durchgeführt werden. Dies führt zu einer typischen Anzahl von Lastzyklen für jede Druckhöhe des Wassers. Die ertragbaren Lastzyklen N resultieren aus den gegebenen Kerbklassen und der Belastung gemäß der Wöhlerlinien.

$$D = \sum_{i=0}^{k} \frac{n_i}{N_{Rd,i}} = \frac{n_1}{N_{Rd,0}} + \frac{n_2}{N_{Rd,1}} + \cdots = \frac{k \cdot n_d}{N_{Rd,Ä}} \tag{2}$$

Die genaue Berücksichtigung von Ermüdungsbelastungen an allen spezifischen Kerben in Verbindung mit der zum Stahlwasserbau passenden Duktilität könnte dazu beitragen, Risse im Bauwerk zu vermeiden (vor allem Risse aufgrund von Ermüdung und Sprödbruch).

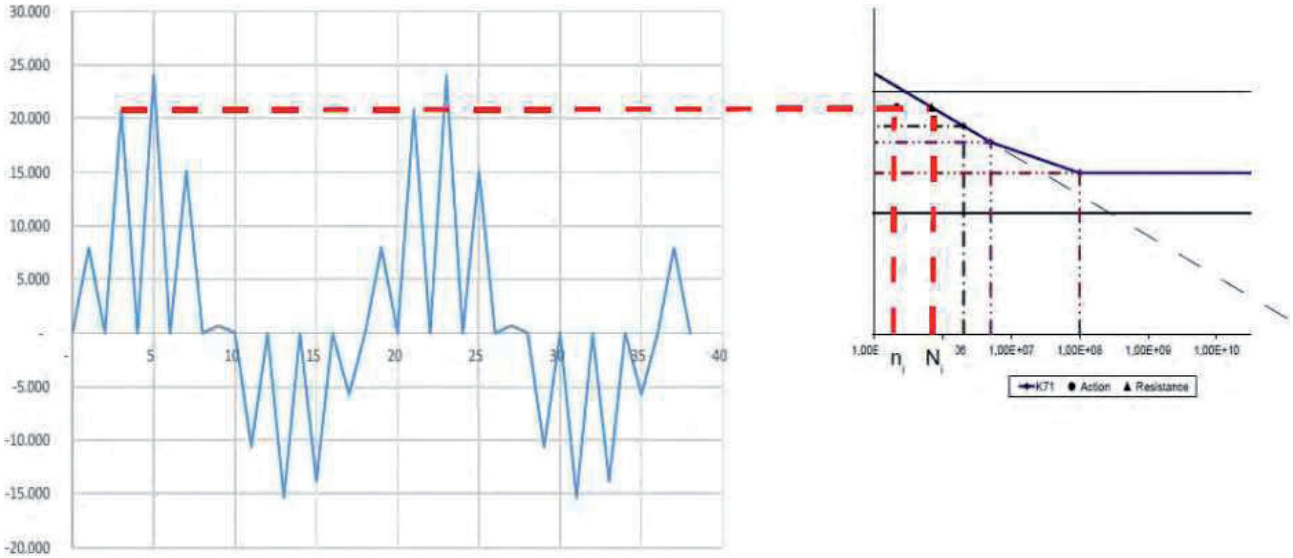


Abbildung 3-3 Schematischer Vergleich der Unterschiede der Wasserstände zu Wöhler-Kurven

3.2. Höchstbelastung durch Wellen

Eine weitere Funktion der Schiebetore ist der Hochwasserschutz. Die Schleuse ist ein integraler Bestandteil der Hochwasserschutzlinie entlang der Nordseeküste. Sturmfluten können laut Vorhersagen Höhen von etwa + 8,88 m über dem Meeresspiegel erreichen. Der Bemessungshochwasserstand beträgt + 7,00 m über dem Meeresspiegel. Die Erhöhung der Festlegung des Wasserstands und daraus resultierend der Bordwand (auf + 7,60 m über dem Meeresspiegel) berücksichtigt die Folgen des Klimawandels.

In Anbetracht des zu erwartenden Anstiegs des Meeresspiegels wird der obere Teil des Tors nur von Wellen belastet. Während eines Hochwassers könnte beispielsweise Wasser durch Undichtigkeiten auch in den Nord-Ostsee-Kanal gelangen. Das durch Wellen in den Nord-Ostsee-Kanal eingetragene Wasser wird zu keinem zu beachtenden Anstieg des Wasserstands führen. Aus diesem Grund wurden die Dichtigkeitsanforderungen für die Bereiche, in denen nur Wellen auftreten, gesenkt.

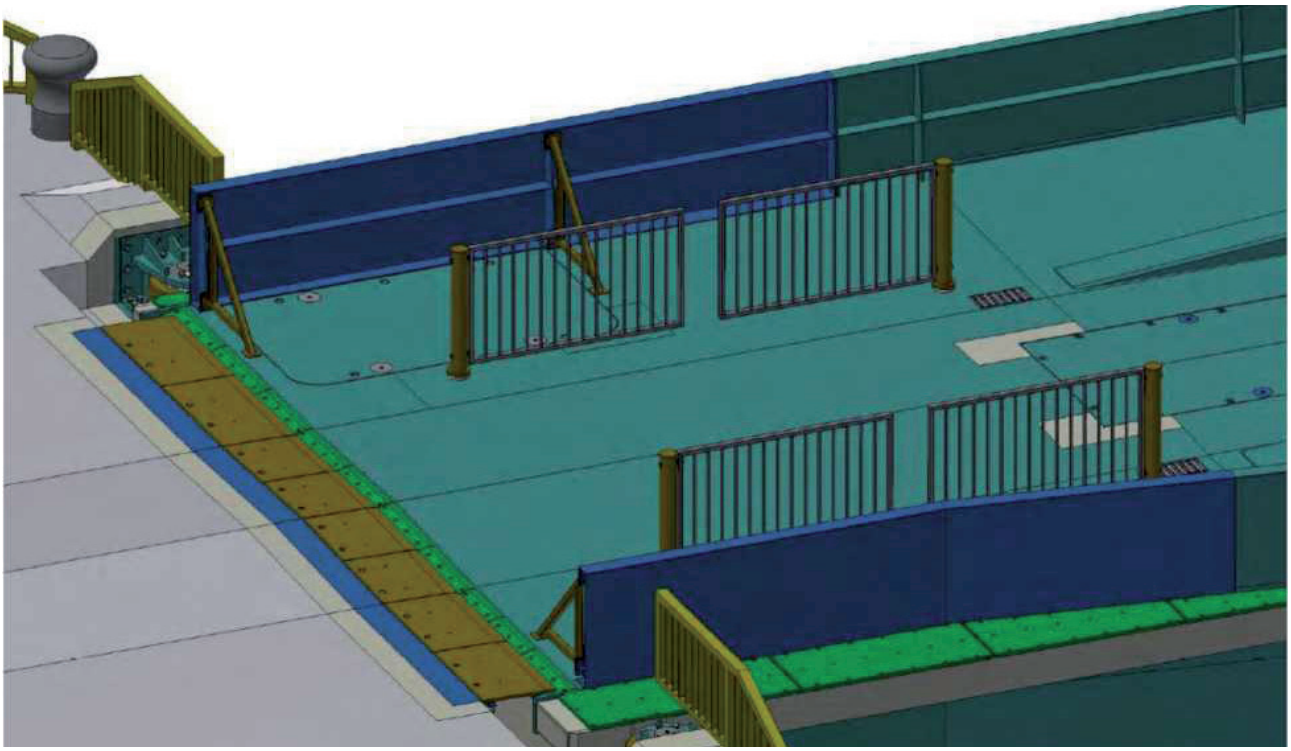


Abbildung 3-4 Hochwasserschutz, Bodenwand des Tors erhöht

Die Entwurfsanforderungen ergaben sich aus einem Wellengutachten. Da DIN 19704 keine Anforderungen bezüglich Wellenbelastungen stellt, werden die EAU dafür herangezogen. Der Ansatz ist für große Tore konservativ, da sich große Schleusentore deutlich stärker verformen als Dämme, weswegen Stoßkräfte in niedrigerer Höhe wirken. Daraus ergeben sich die folgenden Beladungszustände für die Schiebetore.

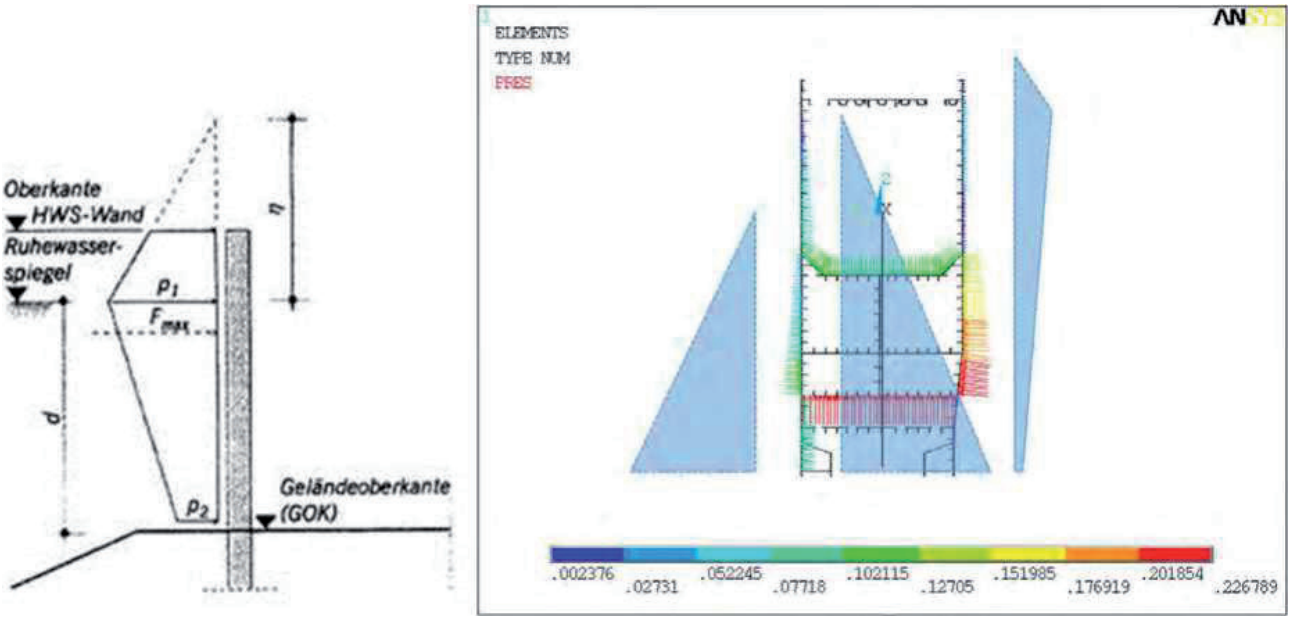


Abbildung 3-5 Wellenbelastung (links) und Umsetzung in der Berechnung (rechts)

4. Entwurfsanforderungen und Anforderungen aufgrund der Auslegung, Interaktionen und Auswirkungen

Seit dem Bau der großen historischen Schleusen im Jahr 1914 haben sich die Herstellungsmethoden, Sicherheitsanforderungen (z. B. Entwurfsplanung) und sozialen Anforderungen wie etwa Arbeitsschutz bedeutend geändert. Obwohl die grundlegenden Dimensionen gleich geblieben sind, führt dies zu vollkommen anderen Detaillösungen. Beispiele für Anforderungen und ihre Interaktionen werden im Folgenden beschrieben.

4.1. Sicherheitsanforderungen vs. Schwimmtiefe

Aufgrund steigender Schadenswerte bei Ausfällen verlangt die Gesellschaft nach zunehmend großer Verfügbarkeit und somit Sicherheit für tragende Bauwerke, Vorgänge, usw. (Schneider & Schlater, 2007). Höhere Sicherheit erfordert eine robustere Auslegung von Bauwerken. Ermüdung wurde für die alten Tore der Brunsbütteler Schleuse beispielsweise nicht untersucht. Aus diesem Grund sind viele Bauwerke schwerer als in der Vergangenheit.

Bei einem Schiebetor verhält sich das zusätzliche Gewicht proportional zur Verteilung des Gesamtgewichts, da alle Teile des Tors in einer ersten Annäherung gleichermaßen betroffen sind. Die zusätzliche Masse kann nur mit zusätzlichen Auftriebzellen ausgeglichen werden, um die maximal mögliche Schwimmtiefe zu erreichen und die Stützlasten optimal auf die tragenden Bauwerksteile zu verteilen (Torunter- und -oberwagen). Soll die Schwimmtiefe der Tore gleich bleiben, kann aufgrund der oben beschriebenen Massezunahme zusätzlicher Auftrieb oft nur durch Auftriebzellen erreicht werden, die im unteren Teil des Tores angebracht werden. Dies beeinträchtigt wiederum die Schwimmstabilität, was nur mit Ballast an der Unterseite des Tors ausgeglichen werden kann. Dieser zusätzliche Ballast macht wiederum mehr Auftrieb notwendig, das heißt, das System auf die allgemeinen Auslegungsbedingungen sensibel reagiert; siehe auch Abschnitt 4.3.3 Schwimmstabilität.

4.2. Arbeitsschutz vs. Auftriebssicherheit

Ein Ergebnis veränderter Arbeitsschutzanforderungen ist, dass alle Zugänge breiter und weniger geneigt sein dürfen als früher. Infolgedessen benötigen Zugänge zu Maschinenräumen deutlich mehr Platz. Da Treppen (als Hohlkörper) den Auftrieb mit steigendem Wasserspiegel immer erhöhen, steigt der Gesamtauftrieb des Schiebetors, je größer die Treppen sind. Bei alten Toren führen lediglich Leitern zu den Maschinenräumen.

Ein Materialschacht mit ähnlichen Ausmaßen zum Herablassen von fertig zusammengesetzten Teilen in den Maschinenraum im Tor wird benötigt. Mit einem mobilen Davitkran kann dieser Schacht auch genutzt werden, um Verletzte aus dem Maschinenraum zu bergen.

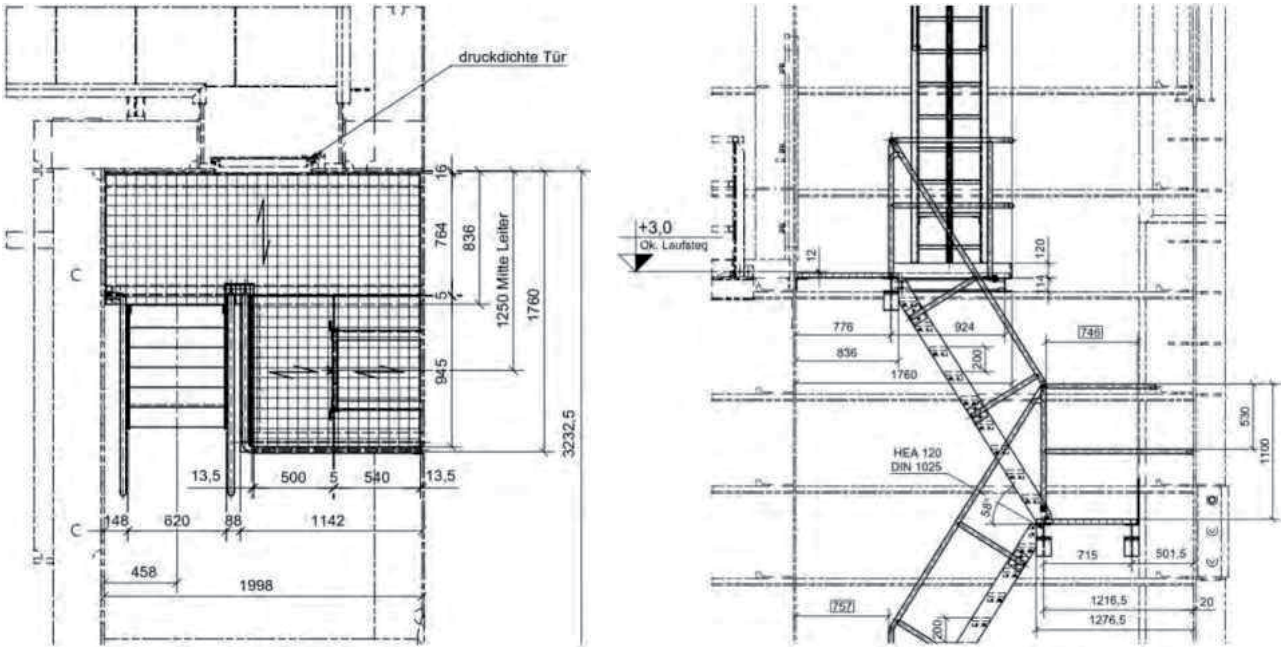


Abbildung 4-1 Treppenaufbau, Querschnitt

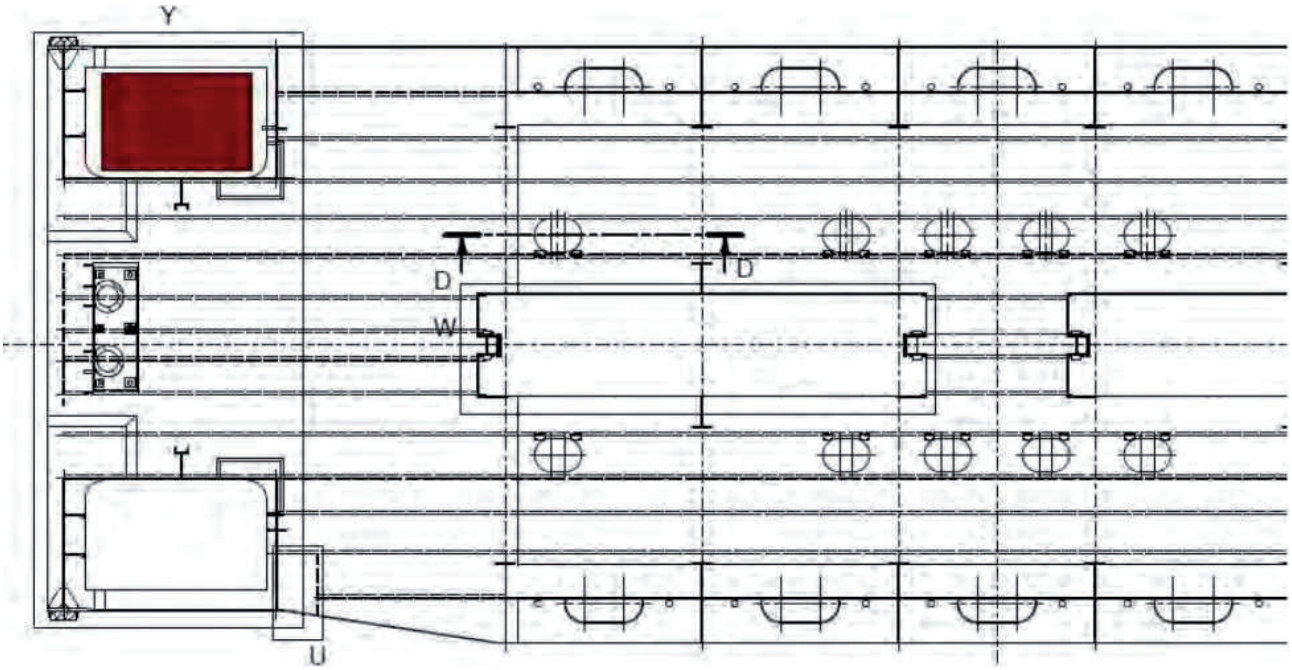


Abbildung 4-2 Materialschacht mit maximalen Transportgrößen

Der zuvor beschriebene zusätzliche Auftrieb hat eine negative Auswirkung auf die Auftriebssicherheit des Tors während des Betriebs. Es muss sichergestellt werden, dass das Tor nicht aufzuschwimmen beginnt, unabhängig von der Höhe des äußeren Wasserstands. Der zusätzliche Auftrieb macht deshalb zusätzlichen Ballast notwendig, damit sichergestellt ist, dass das Tor nicht aufschwimmt. Dieser zusätzliche Ballast wird nur teilweise vom höheren Bauwerksgewicht des Tors ausgeglichen (vgl. Abschnitt 4.1). Der darüber hinaus benötigte Ballast kann variabel durch das Ballast-/ und Lenzsystem eingebracht werden. Um die Schwimmstabilität zu verbessern, kann der zusätzliche Ballast auch in Form von permanentem Ballast hinzugefügt werden, etwa durch schweren Beton am Boden des Tors, vgl. Abbildung 4-3.

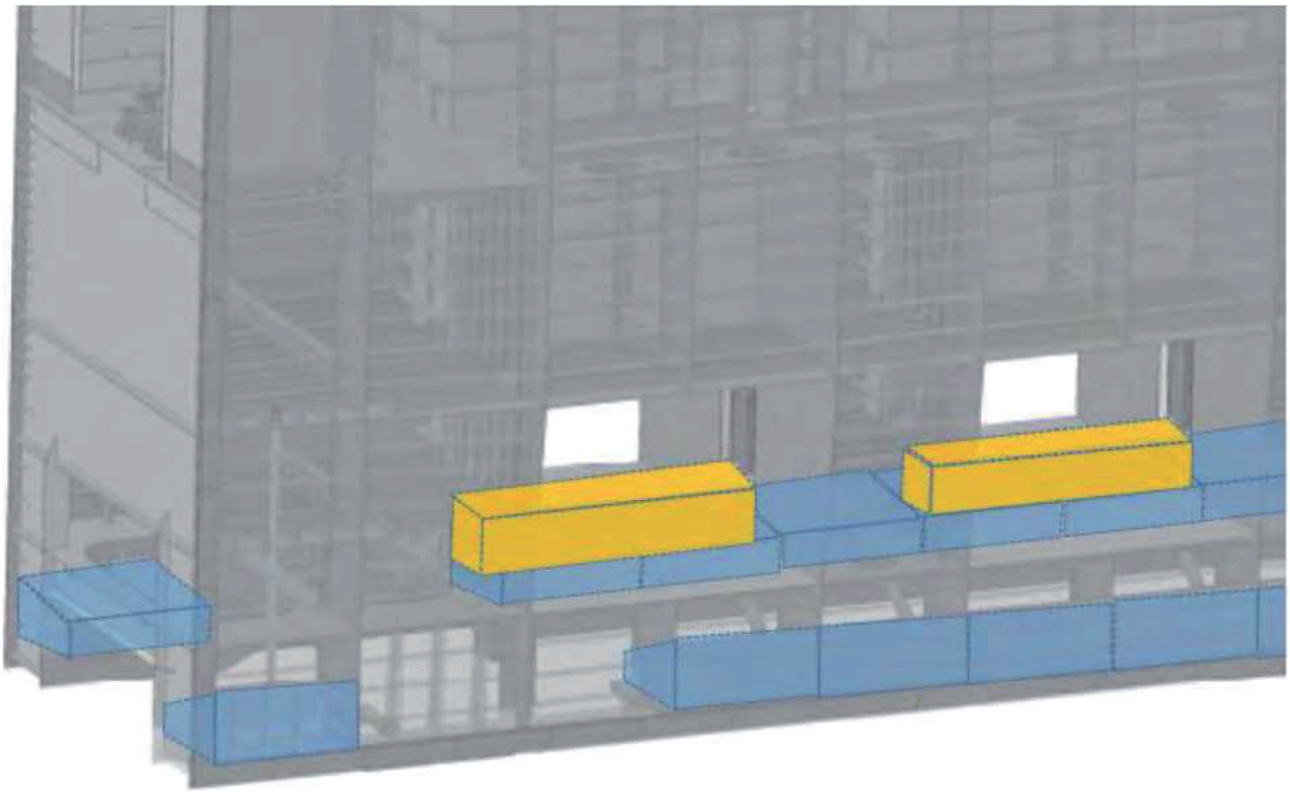


Abbildung 4-3 Identifizierung von Hohlräumen für permanenten Ballast (blau: methodisch genutzt / orange: Planungsreserve)

Die Treppen wurden in den Ecken angebracht, um für maximale Stabilität beim Einbau und Senken der Tore zu sorgen (analog beim Einbau und Ausschwimmen), siehe Abbildung 4-4. Aufgrund der hohen Steiner'schen Anteile der Treppenschächte beim Eintauchen der Tankdecke ins Wasser bleibt das Tor deutlich stabiler als vergleichbare Tore mit zentral eingebauten Treppen.

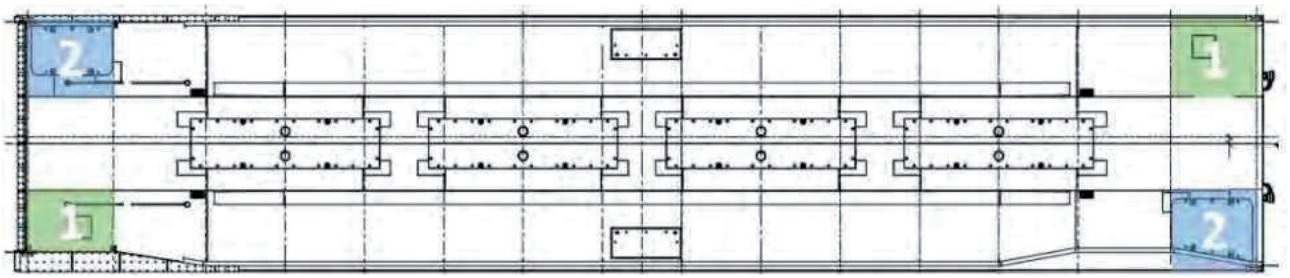


Abbildung 4-4 Blick auf das Schiebetor (1 - Treppe / 2 - Treppe in der Ecke)

4.3. Schwimmeigenschaften

Die Schwimmeigenschaften haben Einfluss auf einige bedeutende Parameter der Konstruktion; die Konstruktion wiederum hat auch Einfluss auf die Schwimmeigenschaften. Die Schwimmeigenschaften können grundsätzlich nach den folgenden Parametern unterschieden werden.

4.3.1. Schwimmtiefe

Grundsätzlich hat die Schwimmtiefe eine Untergrenze. Das liegt beispielsweise an den Bedingungen für Ein- und Ausbau (das Tor muss über dem Drempel und dem bereits eingebauten Torunterwagen schwimmen), aber auch daran, dass alle Bereiche in der Nähe der Schleuse bei zuvor festgelegten Wasserständen erreicht werden müssen. Die Schwimmtiefe unter Berücksichtigung der Gezeiten bestimmt somit den Zeitraum, in dem das Tor mit zuvor definiertem Mindestabstand über dem Torunterwagen abgesenkt werden kann. Sobald das Tor über den Torunterwagen geschwenkt wurde, muss der Mindestabstand nicht mehr eingehalten werden.

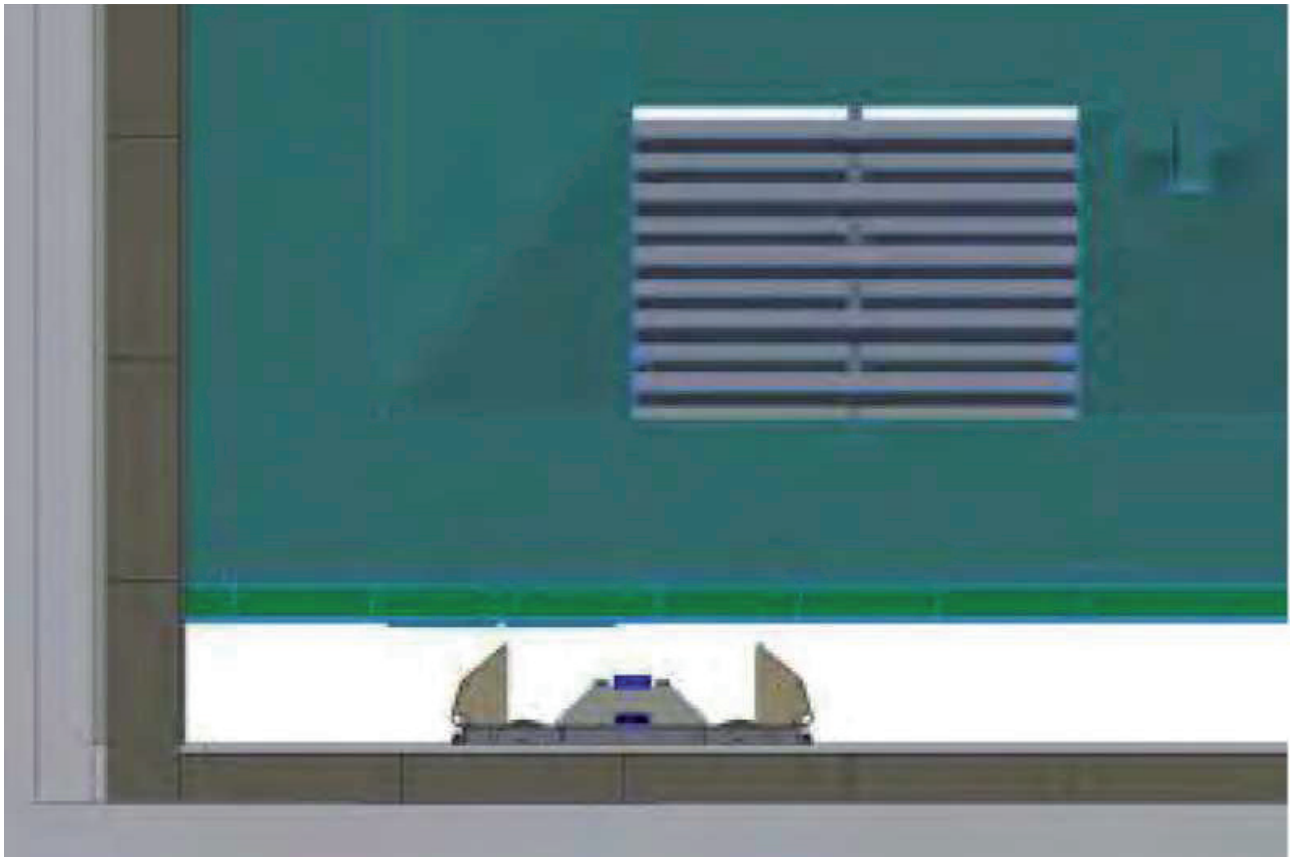


Abbildung 4-5 Darstellung eines über dem Torunterwagen schwimmenden Tors

Die Zeit, die für die Installation des Tors durch Schlepper über dem Torunterwagen verbleibt, kann anhand der Gezeitengeschwindigkeit festgelegt werden. Der Prozess des Einschwenkens sollte mit Beginn der Flut beginnen.

Zwei zusätzliche Hebepontons sind für das 5SKB-Projekt eingeplant. Die Hebepontons können ohne zusätzliche Großgeräte am schwimmenden Schiebetor angebracht werden. Die Hebepontons sorgen für zusätzlichen Auftrieb und reduzieren dadurch die Schwimmtiefe des Tors. Zudem ist die Schwimmstabilität der Kombination aus Tor und Ponton deutlich höher als des schwimmenden Tors als solches. Auf die Hebepontons wird in diesem Artikel nicht weiter eingegangen.

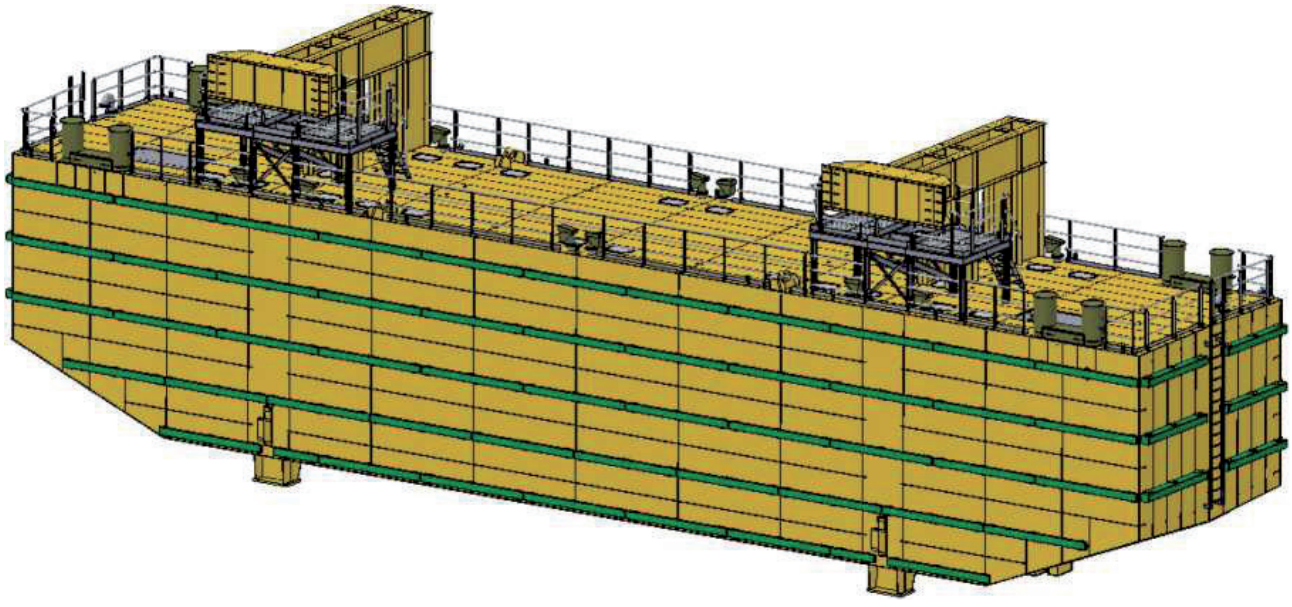


Abbildung 4-6 Darstellung eines Hebepontons

4.3.2. Auftriebssicherheit vs. Lasteinleitung

Auftriebssicherheit ist in Deutschland normativ geregelt, da schwimmende Tore bei Sturmflut ein enormes Risiko für die hinter der Hochwasserschutzlinie befindlichen Städte darstellen. Diese Auftriebssicherheit hängt nicht von der Größe des Bauwerks, den Planungsverfahren oder den Herstellungsprozessen ab. In diesem Fall wäre eine systematische statistische Analyse angebracht, um Sicherheitsfaktoren unter Berücksichtigung aller Parameter und ihrer statistischen Verteilung zu ermitteln. In diesem Zusammenhang würde die gewählte Tiefe der technischen Bearbeitung, der Konstruktion sowie der Herstellungsprozesse berücksichtigt werden.

Die Massen und Auftriebsvolumina können mit einem 3D-BIM-Modell auf Grundlage des Baubestands deutlich genauer festgelegt werden als auf Grundlage einer einfachen zweidimensionalen Entwurfszeichnung. Da Sicherheitsfaktoren auch immer berücksichtigen, wie die eigentlichen Bauteile im numerischen Modell dargestellt werden, könnten die benötigten Sicherheitsfaktoren beispielsweise durch gesteigerte Genauigkeit der Methoden verringert werden.

Die Sicherheitsfaktoren gehen aus dem wirkenden Auftrieb (z. B. Ballastzellen, Maschinenräume, Festkörperauftrieb) und den Gegenantriebskräften hervor [z. B. Eigengewicht der eingebauten Tore (in Abhängigkeit von der Methode zur Gewichtsbestimmung), Ballast (permanent und variabel), variable Lasten wie Schlick].

Hinsichtlich des variablen Ballasts (Füllen von Ballasttanks) muss die Zuverlässigkeit der Verfahren in die Berechnung berücksichtigt werden (automatisches Füllen, Monitoring des automatischen Füllens, Mitarbeiter (und ihre Qualifikation) zur Überwachung vs. ausschließlich aus der Ferne gesteuert). Damit sollte die Wahrscheinlichkeit für die Lagesicherheit des Tors gemäß den Anforderungen der Gesellschaft nachgewiesen werden. Dieser Nachweis sollte berücksichtigen, dass ein Stabilitätsverlust zu beträchtlichem Schaden für die Städte führen könnte, die hinter der Deichschutzlinie liegen.

Die wichtigsten Anteile der Auftriebskraft sind der Auftrieb aller Ballastzellen und der Maschinenräume. Die Größe und Anordnung der Ballastzellen müssen so gewählt werden, dass das gesamte Tor sicher schwimmt. Der Auftrieb durch die Ballastzellen muss jedoch auch mit zusätzlichem Ballastwasser kompensiert werden, einschließlich eines Puffers zusätzlich zum Eigengewicht des Tors sowie zu allen dauerhaft installierten Geräten, um der Auftriebssicherheit des Tors im Betrieb gerecht zu werden.

Die grundsätzliche Festlegung der Auftriebssicherheit in Deutschland führt zu vergleichsweise hohen Traglasten für schwere Bauwerke. Auch während des Betriebs muss die Auftriebssicherheit gewährleistet sein. Für eine spezifizierte Sicherheit über 1,10 (= Rd / Ed) müssen beispielsweise mindestens 10 % der Gesamtmasse des Tors über das Stützbauwerk abgetragen werden (Toroberwagen / Torunterwagen und deren Lastweiterleitung, z. B. in das Rad-Schiene-System). Damit ergibt sich die maßgebende Belastung der vertikalen Richtung aus den Anforderungen an die Auftriebssicherheit.

4.3.3. Schwimmstabilität

Die Kriterien für Schwimmstabilität müssen für das schwimmende Tor eingehalten werden, sodass dieses trotz Wellen und Wind den Anforderungen an den Arbeitsschutz gerecht wird. Die Stabilitätskriterien umfassen die numerische Ungenauigkeit der Differenz hoher Zahlen (Auftrieb und Abtrieb sind bei einem schwimmenden Tor gleich; Kräftegleichgewicht). Die Herstellung muss daher sehr sorgfältig geschehen; am besten mit der gewogenen Masse der eingebauten Tore oder einer Gewichtsberechnung während in der Werkstattplanung, die einer Verwiegung gleichkommt. Andernfalls können die Zielwerte nicht erreicht werden (z. B. Schwimmstabilität, Schwimmtiefe, usw.).

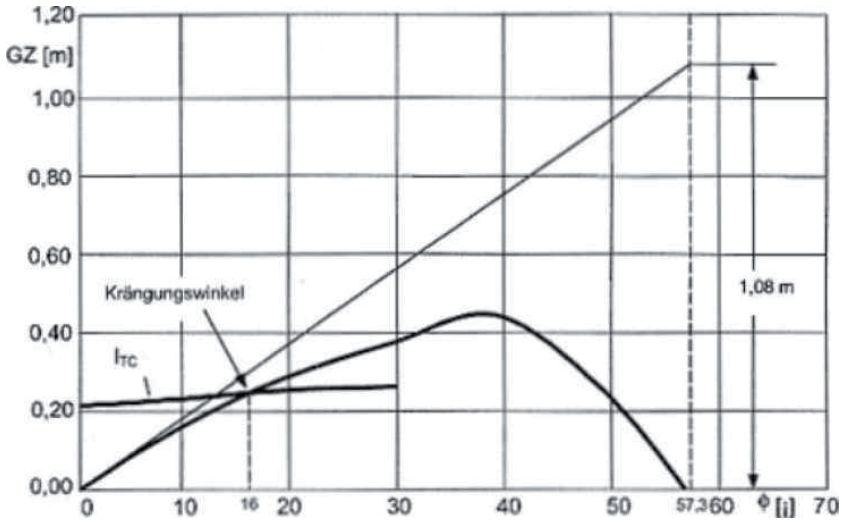


Abbildung 4-7 Beispiel einer Hebelarmkurve mit Darstellung der metazentrischen Höhe (1,08 m bei 57,3°)

Generell wird die Schwimmstabilität durch metazentrische Höhen festgelegt. Zudem werden Eigenschaften der Schwimmstabilität durch Anforderungen der Hebelarmkurve beschrieben. Dabei kann der Zusammenhang für Rechteckquerschnitte dadurch beschrieben werden, dass die metazentrische Höhe bei 57,3° (= 1,0 rad) aufgetragen die Ursprungstangente an die Auftriebshebelarme wiederspiegelt.

$$h_M = \frac{I_0}{V_W} - h_k \qquad (3)$$

In dieser Gleichung ist I_0 das Trägheitsmoment der eingetauchten Fläche um die Achse, um die Schwimmstabilität untersucht werden soll. Daraus ergibt sich:

$$V_W = \frac{G_{Tor}}{\gamma_W} = V_{Schwimmtank} + V_{Rest} = A_{Tank} \cdot t_{Tank} + V_{Rest} \qquad (4)$$

G_{Tor} Gesamteigengewicht des Tors mit allen Geräten; Alle anderen Gewichte durch Verunreinigung, Vegetation werden in den entsprechenden Kombinationen analysiert

γ_W Rohdichte des Wassers

$V_{schwimmtank}$ Das Volumen des Schwimmtanks unter Wasser

V_{Rest} Das Restvolumen aller anderen Körper unter Wasser. Bei einem Schiebetor ist dies vor allem das Volumen aller Stahlquerschnitte unter dem Schwimmtank

A_{Tank} Die Oberflächen aller Ballastzellen

t_{Tank} Die Eintauchtiefe des Tanks

Die Eintauchtiefe spielt eine wichtige Rolle, da sie einen bedeutenden Parameter der Schwerpunktlage des Auftriebs festlegt. Dies wird zur Bestimmung von hk benötigt. hk ist die Hubhöhendifferenz zwischen dem Schwerpunkt des Eigengewichts und dem Auftrieb, was wie folgt berechnet werden kann:

$$h_k = a_G - a_v$$

$$h_k = \frac{\sum G_i \cdot e_i}{\sum G_i} - \frac{\sum A_i \cdot e_{A,i}}{\sum A_i} = \frac{\sum G_i \cdot e_i}{\sum G_i} - \frac{\gamma_W \cdot \sum A_i \cdot e_{A,i}}{\sum G_i} \qquad (5)$$

$$h_k = \frac{1}{G_{Tor}} \cdot \left(\sum G_i \cdot e_i - \gamma_W \cdot \sum A_i \cdot e_{A,i} \right)$$

Alle Hubdaten beziehen sich auf den Kielpunkt, d. h. in diesem Fall das Zentrum des schwimmenden Tanks. Die einzelnen Schwerpunkte werden mit ihren Hebelarmen $\Sigma G_i \ e_i$ und $\Sigma A_i \ e_i$ multipliziert. Diese Zahlen, die voneinander abgezogen werden, sind deutlich höher als ihre Differenz. Wenn also eine der Zahlen auch nur geringfügig schwankt, was aufgrund der Toleranz immer der Fall ist, sind die Auswirkungen auf das Ergebnis groß. Deshalb bedarf es besonderer Sorgfalt bei der Bestellung des Materials im Fall von Änderungen, während des Aufbaus, usw., sodass die Schwimmstabilität einen akzeptablen Wert erreicht.

Im Gegensatz zu großen Schiffen ist die Beschreibung der äußeren Form des Schiebetorkörpers, der Wasser verdrängt, deutlich schwieriger. Dies liegt an der zerklüfteten Form, die häufig entlang der Längsachsen nicht symmetrisch verläuft. Die Asymmetrie der 5SKB ergibt sich aus den Anforderungen des Schwimmprozesses. Die Stauwand ist auf einer Seite gekrümmt, um genügend Raum zum Einschwimmen in die Torkammern zu haben.

Die Belastung durch variable Lasten auf den Toren resultiert nicht aus den Lademeistern (Schiffen), sondern teilweise zufällig aus natürlichen Prozessen wie Schlickablagerungen usw. oder aus dem Betrieb des Systems. Es sind nicht zu allen Zeiten Mitarbeiter vor Ort; vielmehr wird die Schleuse von einer Kontrollstation aus gesteuert. Eine Auswirkung ungleicher Neigungen (Trimm/Krängung) kann beispielsweise durch installierte Messsysteme auf der 5SKB festgestellt werden.

Die Sensitivität wird auf Grundlage der Zwischenergebnisse der berechneten Schwimmstabilität für die Schiebetore der 5SKB dargestellt. Der Graph kann hier als extremes Beispiel herangezogen werden. Wenn der Schwerpunkt des Auftriebs av um 10 % nach unten verlagert wird, wird die metazentrische Höhe und somit die Schwimmstabilität um 50 % verringert. Die Sensitivität der Schwimmstabilität zeigt, dass die Werkstattplanung und die Herstellung extrem sorgfältig vorgenommen werden müssen, da beispielsweise zusätzliche oder verringerte Masse dazu führen, dass das Tor höher oder niedriger schwimmt. Aus diesem Grund muss die Herstellung sehr sorgfältig geschehen. Mit ausreichender Gegenmaßnahme im Werkstattplanen muss eine Gewichtsberechnung wie verwogen durchgeführt werden.

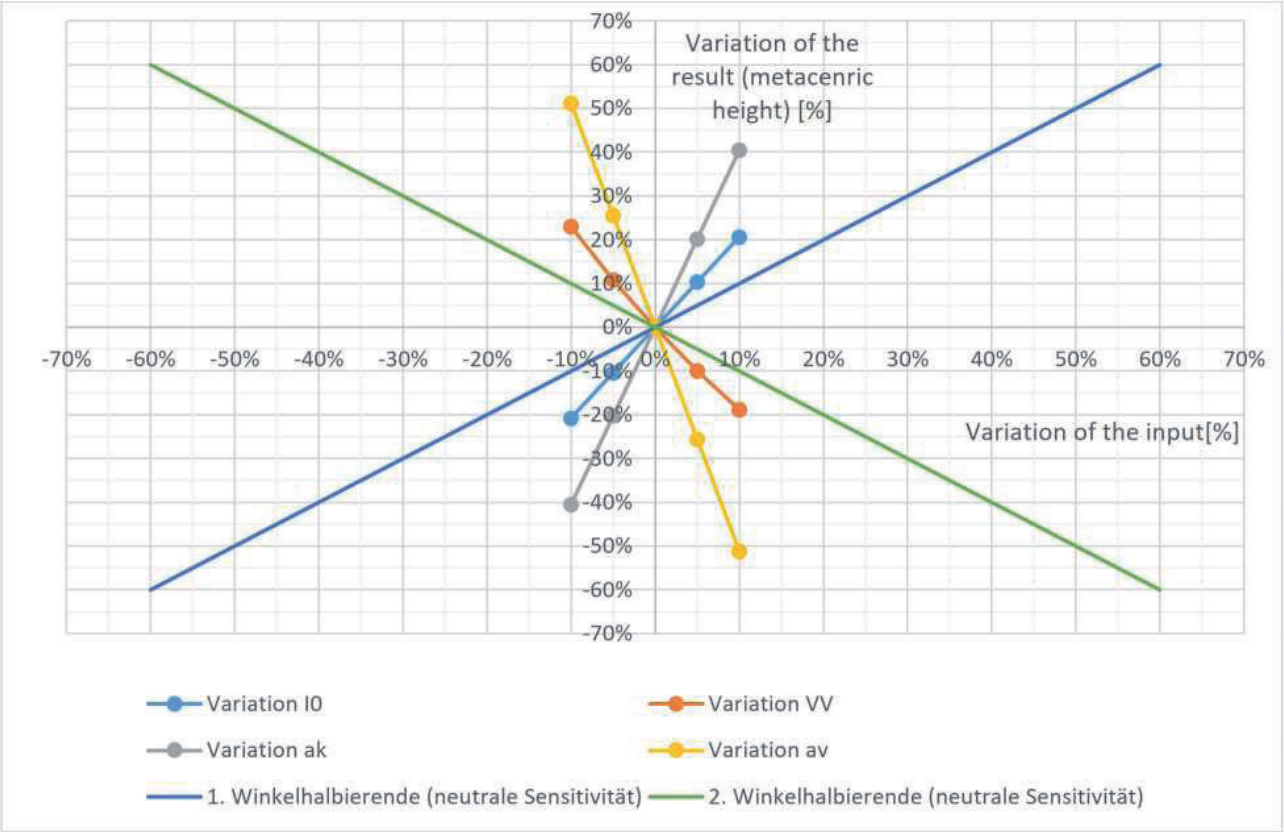


Abbildung 4-8 Sensitivitätsanalyse der Eingangswerte und ihre Auswirkungen auf die metazentrische Höhe

Alle erwähnten Parameter unterliegen der Toleranz. Dies betrifft den Entwurf und die Herstellung des Stahlbaus (z. B. Walztoleranz, Abweichung bei einzelnen Maßen, Hilfsgeräte für den Aufbau) sowie die Schichtdicke des Korrosionsschutzes. Davon abgesehen sind alle variablen Auswirkungen wie Schlick, Verunreinigung und Vegetation schwer zu beurteilen und niemals genau zu erfassen. Die Lage des Schwerpunktes des Auftriebs unterliegt trotz eines sorgfältigen Entwurfs Ungenauigkeiten, z. B. durch versehentlich eingeschlossene Luft.

Auf Grundlage der metazentrischen Höhe können die aufrichtenden Momente einfach für leichte Veränderungen der Schwimmposition berechnet werden:

$$M_A = G_{Tor} \cdot h_M \cdot \delta\varphi \quad (6)$$

Diese Gleichung gilt für die Umgebung des Ursprungs des austarierten Schwimmkörpers. Dem Widerstandsmoment des Schwimmkörpers (Pantokarene) stehen die Auswirkungen von Wind, Wellen, Schräglage beim Schleppen usw. gegenüber. Diese Auswirkungen sollen für Schleusentore für die genauen Entwurfsbedingungen berücksichtigt werden, z. B. der Transport zum Anlegeplatz und die Distanz bis zum Einsatzort. Im Vergleich zu Schiffen auf offener See sind diese Seegangsparameter deutlich niedriger.

4.4. Füllschütze

Die Füllschütze werden von Hydraulikzylindern betrieben. Für jeden Schützkanal werden zwei Reihen von Schützen angeboten. Die Schütze haben eine doppelte Dichtung, sodass der Schützkanal auch durch je eine Reihe von Schützen abgedichtet werden kann. Zudem sind die Schütze selbstschließend, um ausreichende Zuverlässigkeit für den Verschluss des Nord-Ostsee-Kanals zu gewährleisten. Aus diesem Grund wurden die Füllschütze mit Ballast versehen, sodass sie auch im Falle eines Stromausfalls schließen können. So kann ausreichend Prozesssicherheit gewährleistet werden, um das Hinterland vor Sturmfluten im Fall eines Stromausfalls oder Schadens am Hydraulikzylinder zu schützen.

Hinsichtlich der Schwimmstabilität ist das Anheben der Schütze einer der Schlüsselparameter, da dies aufgrund des vergleichsweise hohen Eigengewichts der Schütze eine maßgebende Auswirkung auf die Schwimmstabilität hat. Diese und andere Parameter werden bei der Festlegung der Verlässlichkeit des Torsystems berücksichtigt.

4.4.1. Anforderungen an den Füllschützentwurf

Die Strömungsgeschwindigkeit ist wichtig für kleinere Schiffe (deren Schwimmposition nicht übermäßig beeinträchtigt werden sollte), für Kräfte im Zusammenhang mit dem Festmachen der Schiffe und den Kolkschutz sowie für die Bewertung von Statik, Dynamik und Ermüdung der Schütze. Ein Schlüsselfaktor für sicheres Füllen ist deshalb der bauliche und strömungstechnische Entwurf der Füllkanäle. Winkelprofile (sogenannte Störwinkel) werden in den Füllkanälen genutzt, um Energie umzuwandeln und den Zustrom in die Schleusenkammer aufzubrechen. So wird der Wasserzufluss aufgespalten, homogenisiert und somit die Maximalgeschwindigkeit des Zuflusses verringert.

Abgesehen von der Wasserstandsdifferenz als solcher hängt die Flussrichtung von unterschiedlichen spezifischen Wassergewichten in der Schleusenkammer und auf der Gegenseite ab (Innenhaupt: Nord-Ostsee-Kanal; Außenhaupt: Elbe). Infolgedessen wurde untersucht, ob Frischwasser in Brackwasser fließt oder umgekehrt (siehe Abbildung 4-9). Die Bilder der folgenden Darstellung zeigen die Computerergebnisse mit der Annahme unrealistischer spezifischer Wassergewichte; reines Frischwasser gibt es bei der Schleuse nicht, zumindest nicht mehr als der hier angegebene Salzgehalt. Die Auswirkung wird jedoch auf Grundlage der Entwurfsanforderungen deutlich. Der tatsächliche Salzgehalt hat spürbare Auswirkungen auf die Kräfte beim Festmachen der Schiffe (Thorenz, September 18-21, 2017). In der Praxis hat sich gezeigt, dass bei ausreichender Redundanz keine Probleme zu erwarten sind.

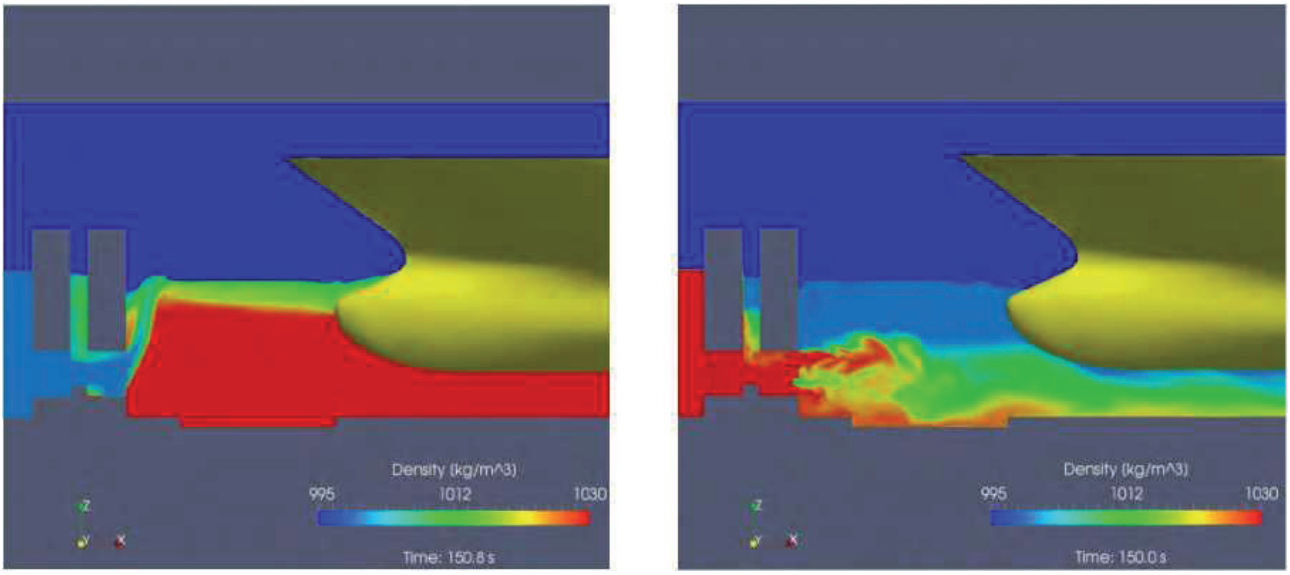


Abbildung 4-9 CFD-Simulation, Auswirkungen unterschiedlicher spezifischer Wassergewichte

Aufgrund der Empfindlichkeit der Teflonbeschichtung gegen Abnutzung an den Dichtungen wurden die Hebekräfte der Schütze nicht optimiert. Die verwendeten Dichtungen waren konventionelle Notenprofildichtungen. Hinsichtlich der Dichtung müssen die Verformung der Tore, das Tragegerüst und die Dichtungen untersucht werden. An den Stellen, wo die Strömung einen großen Einfluss auf die Spalttopologie und somit auf das Strömungsverhalten hat, werden gekoppelte mechanisch-hydraulische Berechnungen (CFD - Computational Fluid Dynamics) benötigt.

Aufgrund des enormen Berechnungsaufwands sind diese Berechnungen für das gesamte System (gesamtes Tor) weder angebracht noch notwendig; stattdessen werden Subsysteme herangezogen. Für diese Subsysteme müssen angemessene Schnittstellen identifiziert werden. An diesen Schnittstellen müssen generelle Bedingungen korrekt überführt werden. Alle Toleranzen und Distanzen müssen so definiert werden, dass die vom Bauherrn gewünschte Dichtigkeit gesichert ist, Störungen an den Dichtungen oder übermäßige Abnutzung jedoch verhindert werden. Schwingungen und Schäden aufgrund von Abnutzung sind wahrscheinlich. Der bauliche und strömungstechnische Entwurf der Füllschütze ist für die Gesamtfunktion der Schleuse von großer Bedeutung.

4.4.2. Füllschütze - Bewirtschaftungsplanung der Anlage

Die Wartung und Reparatur der Füllschütze ist ein wichtiger Teil des Entwurfs. Auf der zugänglichen Oberseite der Tore stehen Flächen zur Kraftableitung für Mobilkräne zur Verfügung. Aus diesem

Grund wurde der Unterhalt der Anlage bereits in den eigentlichen Entwurf aufgenommen. Als graphisches Beispiel wird die Einbaureihenfolge der Füllschütze gezeigt, die zum Zwecke der Wartung vom Tor entfernt werden können. Abbildung 4-10 gibt einen Überblick über die Füllschütze und deren Anbringung.

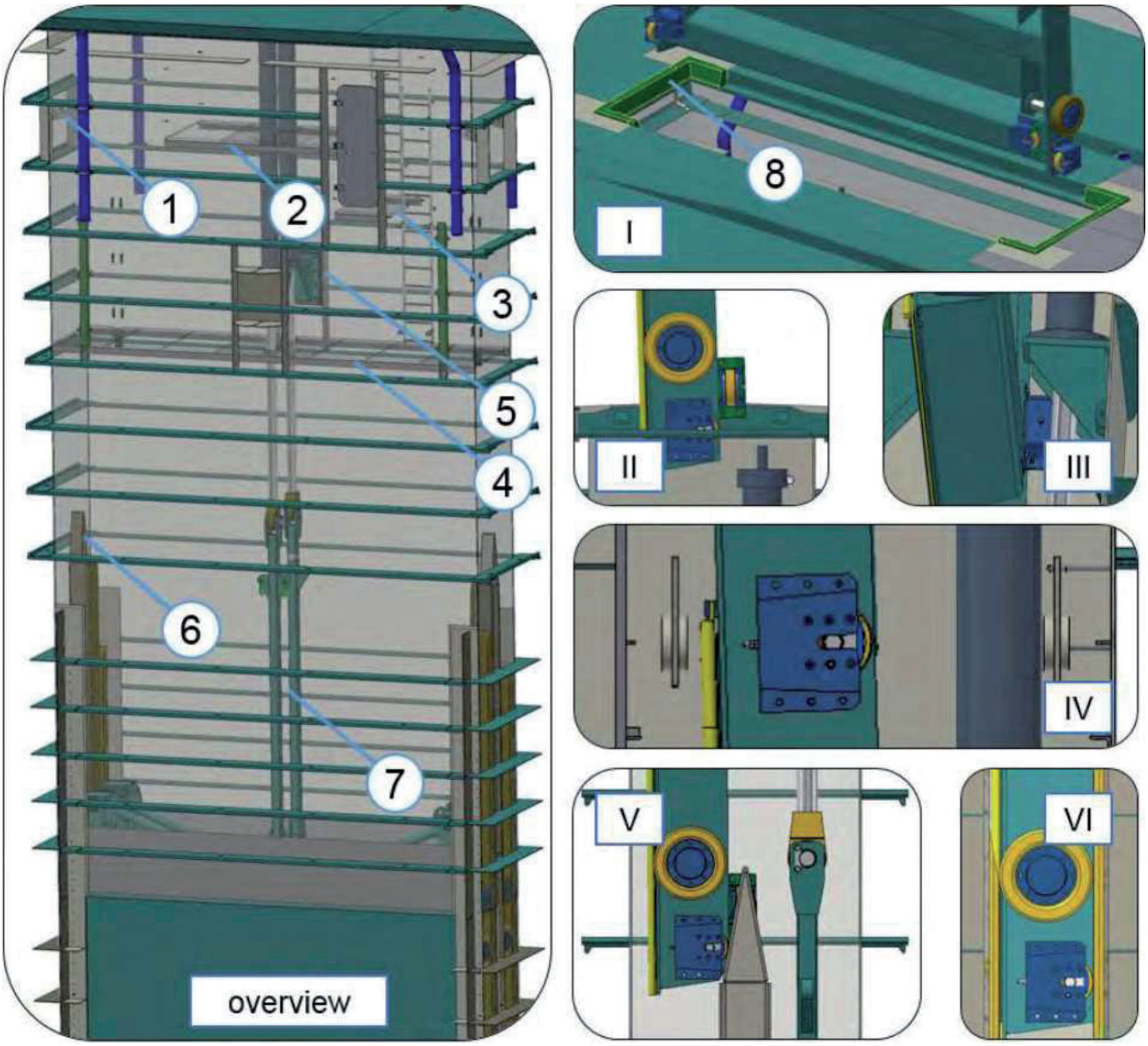


Abbildung 4-10 Darstellung der Füllschütze und wichtiger Punkte während des Einbaus

Abbildung 4-10: Überblick) zeigt die Endfassung, Position wird definiert als Distanz zwischen Überbau und unterer Ecke des Füllschütz (FS), I) FS über Überbau, II) FS 0,5 m unter Überbau - visuelle Überprüfung während Positionierung - Achtung: hydraulisches Leitungssystem, III) FS 4,90 m unter dem Überbau - Flaschenhalszylinder zu beobachten, langsam bewegen, IV) FS 5,66 m unter Überbau - Flaschenhals an Dichtung, Koppel (visuelle Überprüfung), V) Position 9,36 m unter Überbau, Guide-Installation VI) Position 11,84 m unter Überbau - visuelle Überprüfung, federbelastetes Laufrad greift, 1) Hebeöse, 2) hydraulischer Plattformzylinder, 3) Plattformeingang, 4) Plattformzylinderkonsole, 5) Zylinderkonsole, 6) Guide-Installation, 7) Kupplungsstange, 8) temporäre Leitinstallation (UHMW-PE)]

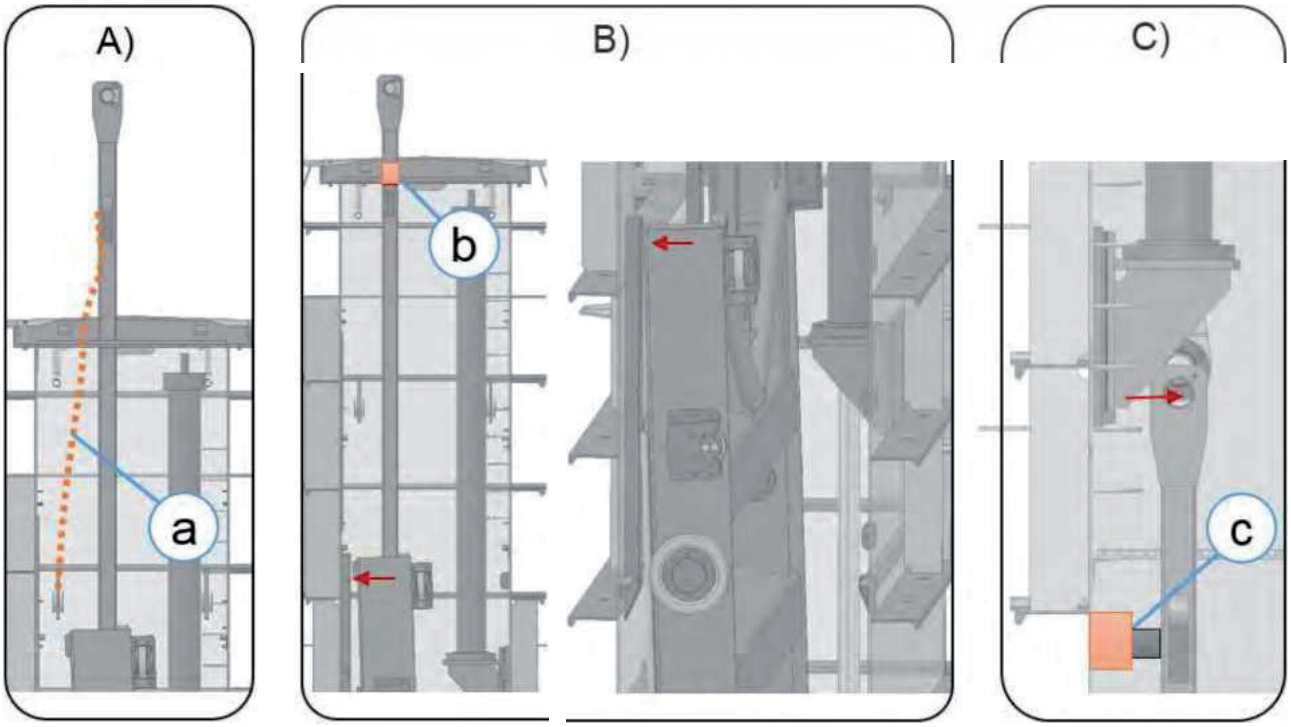


Abbildung 4-11 Darstellung der Füllschütze und Hilfsbauwerk für die Installation

Abbildung4-11. k) FS 7,25 m unter Überbau - Befestigung des Sicherungsseils, B) FS 8,40 m unter Überbau - Positionsmarkierung beachten - FS mit Kran entfernen, um mit UHMW-PE für den Zusammenbau zusammenzuführen C) FS 14,00 m unter Überbau - von Sicherungsseilen (a) in genauer Position gehalten - Kupplungsstange durch hydraulischen Zylinder entfernen (Verbindungszylinder mit Kupplungsstange), a) Sicherungsseil, b) Positionsmarkierung, c) hydraulischer Zylinder

4.5. Spülsystem

In Kombination mit dem Ballast-/ und Lenzsystem wurde für die 5SKB ein Spülsystem eingebaut. Die Spüleinheiten befinden sich in der Tankdecke und in der Nähe der Torunterwagenschienen. Die Aufgabe des Spülsystems ist es, den Bereich des Torunterwagenschienensystems und vor allem die Tankdecke von sedimentiertem Schlick zu befreien. Zudem flutet bzw. leert ein Pumpensystem die Ballasttanks. Dazu sind große Rohre für dieses Pumpensystem auf dem und im Tor notwendig. Die Steuereinheiten für diese Teile werden teilweise auf dem Tor angebracht. Zudem ist ein Maschinenraum im Tor notwendig, um alle diese Einheiten unterzubringen.

5. Kurzfassung

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen ist der Entwurf von Schiebetorbauwerken für Seeschleusen sehr schwierig (eine der schwierigsten Entwurfsaufgaben). Unterschiedliche Fachgebiete müssen dazu herangezogen werden, also Stahlbau, Schiffsbau, Rohrleitungsbau, Maschinenbau, Steuerungstechnik, Automatisierung. Der Entwurf wird am besten in einem dreidimensionalen BIM unter Einbeziehung alle Fachgebiete erstellt. Die numerische Darstellung muss ausreichend transparent sein, sodass die unterschiedlichen Bedingungen eines solchen Tors bildlich dargestellt werden können.

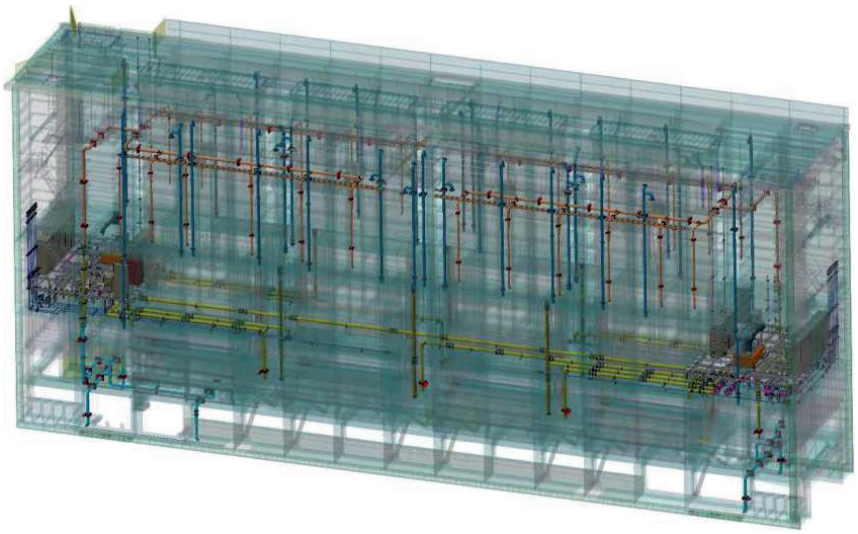


Abbildung 4-12 Torspülsystem (orange Rohre - Tankdecke / blaue Rohre am unteren Ende des Tors - Schienensystem)

Für den erfolgreichen Entwurf und die Herstellung eines so komplizierten Bauwerks müssen alle beteiligten Parteien zusammenarbeiten.

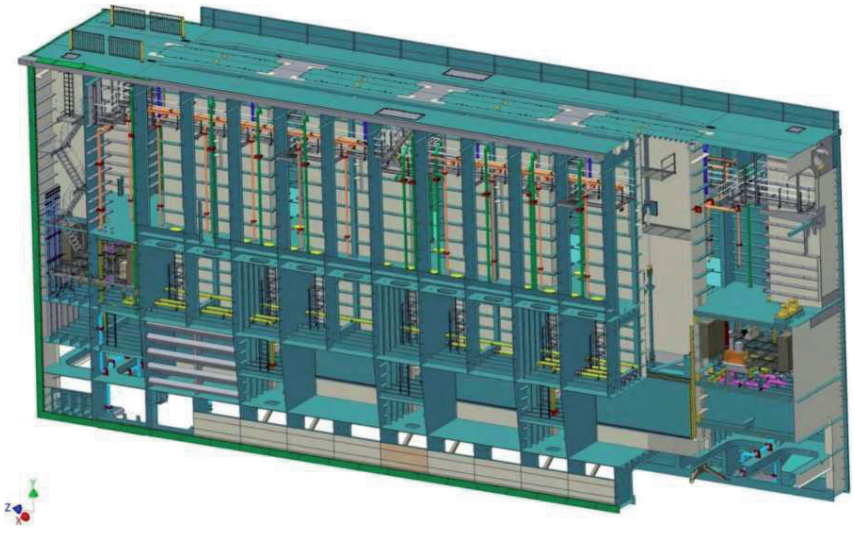


Abbildung 5-1 Isometrisches CAD-Modell der 5SKB

6. Literaturverzeichnis

Brunsbüttel, W. u. (August 2016). Bau der 5. Schleuse in Brunsbüttel.

DIN-EN-1993-1-9:. (2005). Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9 Ermüdung. Brüssel: CEN.

Petersen, C. (2013). Stahlbau - Grundlagen der Berechnung und bauliche Ausbildung von Stahlbauten. München: Springer Vieweg.

Schneider, J., & Schlater, H. (2007). Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen - Grundwissen für Ingenieure. Zürich.

Thorenz, C. (September 18-21,2017). Numerical investigations of salinity effects in locks. 8th international PIANC-smart rivers conference . Pittsburgh.

Strömungsinduzierte Schwingungen an Wasserbauwerken

von Michael Gebhardt[1], Georg Göbel, Martin Deutscher, Walter Metz und Carsten Thorenz

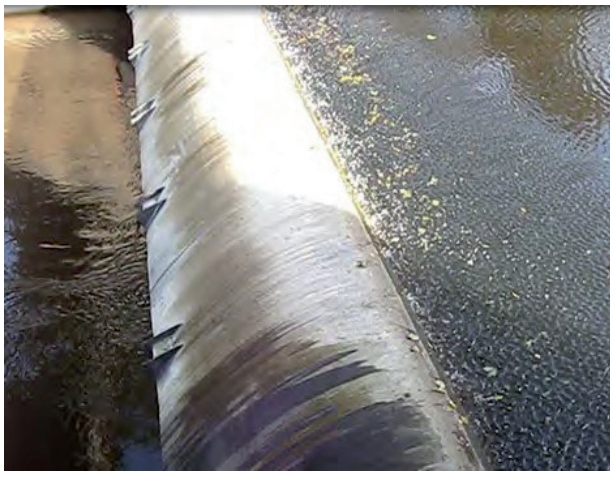
Kurzfassung

Trotz intensiver Forschungen in den zurückliegenden Jahrzehnten, wie z.B. von Naudascher und Rockwell (1994) oder von Kolkman und Jongeling (2007), bereiten strömungsinduzierte Schwingungen auch heute noch Probleme im Wasserbau. So treten Schwingungen nicht nur an alten, sondern auch an neuen Wehrverschlüssen auf, wie zum Beispiel an Drucksegmenten oder Füllschützen von Stemmtoren. Vor diesem Hintergrund initiierte die Bundesanstalt für Wasserbau ein Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, um die unterschiedlichen Ursachen mit Hilfe von Naturmessungen im Betrieb und mit Hilfe von numerischen Modellen zu untersuchen. Ziel ist es, die Anregungsmechanismen zu identifizieren und die derzeitigen Standards zu verbessern (Göbel et al., 2018). In dem Beitrag werden Beispiele vorgestellt, bei denen Wehrverschlüsse oder Teile von Wehrverschlüssen durch Fluid-Festkörper-Interaktion zur Schwingung angeregt werden. Es werden typische Frequenzen für Schwingungen von Wehrverschlüssen, federgelagerten Dichtungssystemen und von elastischen Dichtungen vorgestellt. Für die Betreiber sind die Frequenzen hilfreich, um die Schwingungsquelle zu ermitteln und um dann bauliche oder betriebliche Verbesserungen einzuleiten.

Aufgrund der höheren Elastizität von weit gespannten Wehrverschlüssen können Biegeschwingungen auftreten, wenn der Verschluss durch Unter- oder Überströmung zur Schwingung angeregt wird (Ishii und Knisely, 1992). Ein Beispiel hierfür ist eine Wehranlage an der Weser in Norddeutschland, wo nach dem Öffnen des Wehrverschlusses um wenige Zentimeter Schwingungen beobachtet werden konnten. Bei dem 42 m breiten Hubschütz konnte eine Resonanzfrequenz von 1,5 Hz bestimmt werden. Die Messungen zeigten dass eine Biegeschwingung vorherrscht mit einem charakteristischen Wellenmuster im Oberwasser des Schützes (Abb. 1a). Mit Hilfe von numerischen Untersuchungen wurden die kritischen Zustände, d.h. verschiedene Öffnungsweiten in Kombination mit verschiedenen Unterwasserständen, bestimmt.

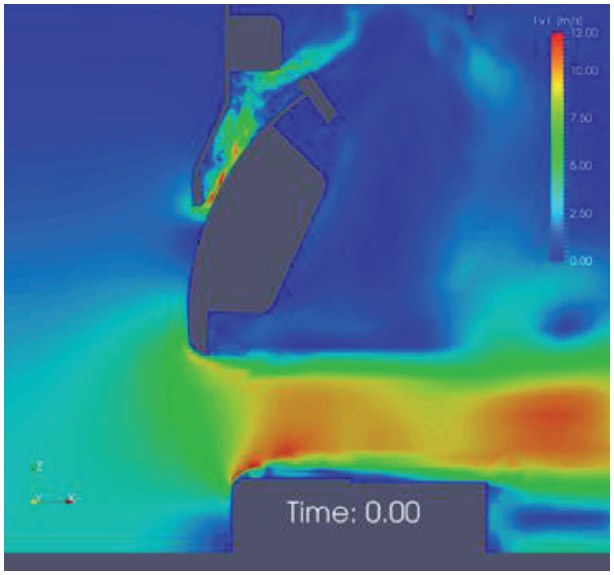
Normalerweise schwingen Wehrverschlüsse in einem einstelligen Frequenzbereich (Abb. 2b & d). Wenn unterströmte Wehrverschlüsse mit federgelagerten Dichtungssystemen ausgerüstet sind, bei denen die Dichtung gegen den Wasserdruck wirkt, neigen sie im Allgemeinen dazu, in geschlossener und leicht geöffneter Position zu schwingen, weil sie elastisch gelagert sind. Diese Bauausführungen sind sehr vielfältig, so dass die Resonanzfrequenz zwischen den verschiedenen Systemen variieren kann. Die Erfahrungen zeigen, dass die Resonanzfrequenz deutlich höher ist und sich in einem Bereich zwischen 15 und 40 Hz bewegt. Abbildung 1b zeigt das durch ein federgelagertes Dichtungssystem erzeugte Wellenmuster.

Abbildung 1: a) Schwingung eines Hubschützes mit Aufsatzklappe und



b) eines Dichtungssystems an einem absenkbaren Hubschütz

1 Bundesamt für Wasserbau, Deutschland, michael.gebhardt@baw.de



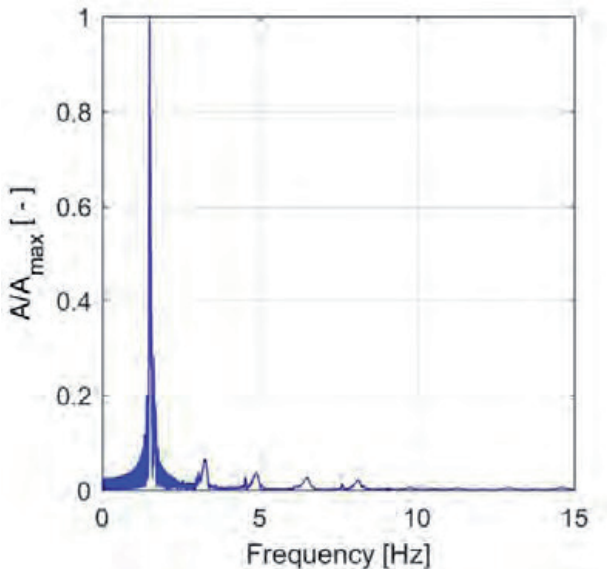
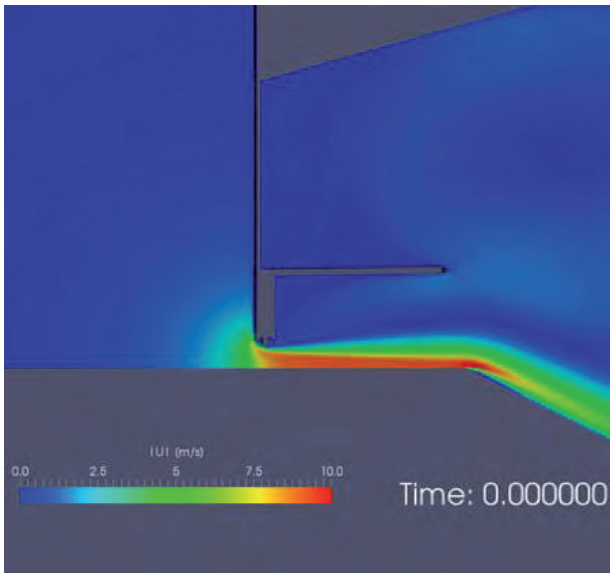


Abbildung 2: Angewandte Methoden: a) Numerische Simulation eines Füllschützes

b) Frequenzanalyse eines Messsignals

c) Beschleunigungssensor am Füllschütz eines Stemmtors und



d) numerische Simulation der Fluid-Festkörper-Interaktion eines Hubschützes

Dichtungen mit Notenprofilen besitzen bei sachgerechtem Einbau zahlreiche Vorteile. Durch die Flexibilität des Gummis passt sich die Dichtung unebenen Oberflächen an und erhöht so die Dichtigkeit. Naudascher und Rockwell (1994) haben bereits darauf hingewiesen, dass Notenprofile bei geringfügiger Öffnung oder bei Undichtigkeiten ebenfalls strömungsinduzierte Schwingungen hervorrufen können. Dichtungsinduzierte Schwingungen traten u.a. an einem neuen Stemmtor am Neckar auf (Abb. 2a). Hier kam es während der Inbetriebnahme bei der Öffnung des Füllschützes um wenige Zentimeter zu starken Schwingungen.

An dem Stemmtor wurden intensive In-situ-Messungen durchgeführt, um die Ursache der Schwingungen zu ermitteln (Abb. 2b). Hierzu wurden an verschiedenen Stellen des Segmentschützes Sensoren angebracht, die übereinstimmend eine vorherrschende Frequenz von 40 Hz anzeigten. Aus dem Vergleich der Signale konnte geschlossen werden, dass die Schwingung an der Kopfdichtung auftrat. Aus diesem Grund wurde die Bauausführung verbessert.

Ein weiteres Beispiel für Dichtungsschwingungen ist ein neues Drucksegment mit Aufsatzklappe. Bei der Inbetriebnahme wurde ein durch Schwingungen ausgelöstes Brummen bei kleinen Öffnungsweiten festgestellt. Zur Bestimmung der Resonanzfrequenz der Schwingungen wurde die Tonaufnahme eines Videos analysiert. Die vorherrschende Fre-

quenz betrug 37 Hz, was gut in den Frequenzbereich von 35 bis 50 Hz für schwingende Notendichtungen passt. Nach Entfernung der Notendichtung war die Schwingung verschwunden.

Zusätzlich zu Feldmessungen und physikalischen Modellen stellen numerische Simulationen der Fluid-Festkörper-Interaktion (FSI) eine sehr vielversprechende Methode dar, um Probleme zu analysieren und Anlagen zu verbessern. Erste Anwendungen werden vorgestellt. Normalerweise werden zwei unabhängige Löser für das Fluid und für den Festkörper verwendet. An der Schnittstelle der Löser ist ein Informationsaustausch erforderlich. Zähigkeits- und Druckkräfte aus dem Fluidbereich werden als Randbedingung für den Festkörperbereich und die Verformung des Festkörpers als Randbedingung für den Fluidbereich festgelegt. Diese Methode wird als geteilter Ansatz bezeichnet und kommt bei dem Löser fsiFoam zur Anwendung, das in OpenFOAM® integriert werden kann (Göbel et al., 2017). Numerische Methoden sind von Vorteil, weil sie die Bewertung von Strömungsparametern an vor Ort schwer zugänglichen Stellen oder sogar in einem physikalischen Modell ermöglichen.

Literaturverzeichnis

Göbel, G; Gebhardt, M.; Deutscher, M.; Metz, W. and Thorenz, C. (2018): Numerical and Physical Study on Seal Vibrations at Hydraulic Gates. 7. IWASA Internationales Wasserbau-Symposium, 15.-18. Mai 2018, Aachen.

Göbel, G.; Gebhardt, M.; Metz, W.; Deutscher, M. (2017): Numerische Modellierung zur Untersuchung strömungsinduzierter Schwingungen im Stahlwasserbau. Wasserbauliche Herausforderungen an den Binnenschifffahrtsstraßen. BAW-Kolloquium, 26.-27. Oktober 2017, Karlsruhe.

Ishii, N.; Knisely, C. W. (1992): Flow-induced vibration of shell-type long-span gates. In: Journal of Fluids and Structures 6 (6), S. 681-703.

Kolkman, P. A. and Jongeling, T. H. G. (2007): Dynamic behaviour of hydraulic structures. Delft: WL|Delft Hydraulics publication (Hydraulic Engineering Reports).

Naudascher, E.; Rockwell, D. (Hrsg.) (1980): Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations. IWASA - IUTAM Symposium Karlsruhe 1979. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

Multifunktionalität von Binnenwasserstraßen - Soziales und Umweltbewusstsein von Binnenwasserstraßenbetreibern

von Andreas Dohms[1], Tom Denes[2], Marc Demanet[3] und Yvon Loyaerts[4]

1. Einleitung

Das Thema der neuen Arbeitsgruppe "Sustainable Inland Waterways – a Guide for Inland Waterway (IW) Managers on Social and Environmental Impacts" (INCOM WG 203) sind die Chancen und Herausforderungen, denen sich Binnenwasserstraßenbetreiber gegenüber sehen und die sich aus der Mehrfachnutzung und Multifunktionalität von Binnenwasserstraßen ergeben. Hierbei geht es auch um das soziale und Umweltbewusstsein der Betreiber, die für den Betrieb und Ausbau dieser Wasserstraßen zuständig sind. Ziel ist es, einen allgemeinen Leitfaden für Binnenwasserstraßenbetreiber bereitzustellen, um deren Bewusstsein für die Notwendigkeit zu schärfen, nachhaltigere Binnenwasserstraßen zu schaffen und dabei die Nutzungsmöglichkeiten und Funktionen zu berücksichtigen, die diese für Interessenträger, wie Gemeinden, Organisationen und Privatpersonen, aber auch für die Industrie und verschiedenste Arten von Unternehmen haben. Auf Grundlage der Untersuchung früherer Berichte oder Begleitunterlagen wird die Arbeitsgruppe ermitteln, wie sich der Ansatz auf die Binnenwasserstraßenverwaltung auswirken wird:

Die Themen für die Präsentationen auf der Sitzung sind:

- Nutzen und Verwendungen von Binnenwasserstraßen von **Andreas Dohms**
- Was bedeutet soziales und Umweltbewusstsein von Betreibern, auch bezeichnet als soziale Verantwortung von Unternehmen (Corporate Social Responsibility, CSR)? von **Tom Denes** und **Marc Demanet**
- Warum brauchen Entscheidungsträger und Ingenieure CSR sowie einen multifunktionalen Ansatz? Einige Anwendungen von **Yvon Loyaerts**

1 Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, Andreas.dohms@wsv.bund.de
2 Arcadis, USA, Tom.Denes@Arcadis.com
3 SECO Belgien nv/ns, m.demanet@seco.be
4 Öffentlicher Dienst Walloniens, Generaldirektion Mobilität & Wasserstraßen, Belgien, yvon.loyaerts@spw.wallonie.be

2. Nutzen und Verwendungen von Binnenwasserstraßen

2.1 Einleitung

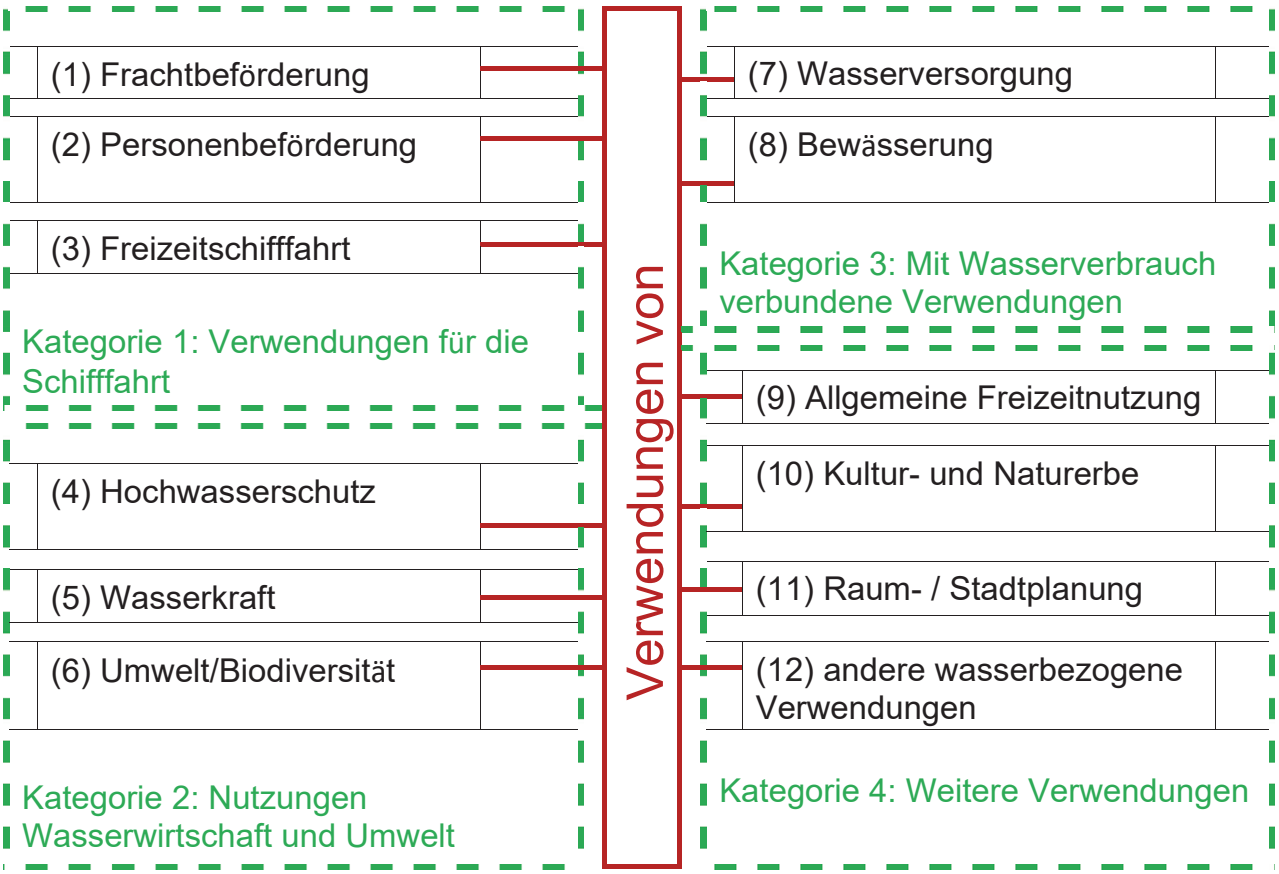
Das menschliche Leben hing schon immer mit dem Wasser zusammen. Neben einem direkten Zugang zum Wasser stellte auch die Nutzung der Flüsse als Verkehrsträger für Fracht und Menschen einen weiteren sehr wichtigen Anreiz dafür dar, sich an diesen niederzulassen. In früheren Zeiten war die Binnenschifffahrt der einzige Verkehrsträger, der gleichsam verfügbar und sicher war. Durch die Verbindung von Flüssen mit künstlichen Kanälen sind Wasserstraßensysteme geschaffen und ausgebaut worden.

Auch heute noch ist die Binnenschifffahrt ein wichtiges Element im nationalen und internationalen Güterverkehr. Weiterhin ist die Binnenschifffahrt als umweltfreundlicher Verkehrsträger anerkannt, insbesondere hinsichtlich ihres niedrigen spezifischen Treibstoffverbrauchs, der im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern zu weniger Kohlendioxid- und Abgasemissionen führt.

Binnenwasserstraßen waren und sind Lebensadern des Güterverkehrs und sie leisten einen Beitrag zu den Volkswirtschaften. Binnenwasserstraßen sind aber weit mehr als das. Flüsse und Kanäle erfüllen viele andere Funktionen und sind auch für die Gesellschaft wichtig. Um diese Wasserstraßen zu betreiben und auszubauen, müssen Binnenwasserstraßenbetreiber eine große Bandbreite von Interessen berücksichtigen, die sich aus den vielfältigen Funktionen der Wasserstraßen ergeben.

2.2 Strukturierung der Nutzen bzw. Verwendungen von Binnenwasserstraßen

Unter Bezugnahme auf frühere Untersuchungen - inner- und außerhalb von PIANC - sind Wasserstraßen mehr als nur Verkehrsträger. Die frühere InCom-Arbeitsgruppe 139 "Values of inland waterways" (Bericht in 2016 veröffentlicht) führt 12 Hauptverwendungen von Binnenwasserstraßen auf:



Diese Liste gibt beeindruckende Einblicke in die Vielfalt der Nutzungen bzw. den Wert von Wasserstraßen, nicht nur für das Schifffahrtsgewerbe, sondern auch für eine breite Palette an Diensten für die Gesellschaft. Auf der einen Seite ist dies ein Vorteil von Binnenwasserstraßen gegenüber anderen Verkehrsträgern. Auf der anderen Seite allerdings ist es eine Herausforderung für die Wasserstraßen-Organisationen, die für die Verwaltung, den Betrieb und den Ausbau dieser Wasserstraßen verantwortlich sind. Darüber hinaus und deswegen sehen sich Wasserstraßen einer großen Bandbreite von Interessen gegenüber, die von einer großen Anzahl sehr unterschiedlicher Interessenträger ausgehen.

2.3 Analyse der Nutzen bzw. Verwendungen von Binnenwasserstraßen

Bei der Untersuchung der Verwendungen werden, wie vorstehend erläutert, die Vorteile der Verwendung und der Nichtverwendung betrachtet, ergänzt durch physische (äußeres Erscheinungsbild) und betriebliche Aspekte, sowie Wechselwirkungen mit anderen Verwendungen. Entsprechend hat die Arbeitsgruppe sieben Schlüsselaspekte erarbeitet, die nachstehend aufgeführt sind:

Eigenschaften und Verwaltung der Wasserstraße	
1	Physische Aspekte der Wasserstraße
2	Betriebliche Aspekte
Sozioökonomische Vorteile und Umweltauswirkungen	
3	Wirtschaftliche Aspekte
4	Umweltaspekte
5	Soziale Aspekte

Differenzierende Erwägungen	
6	Wechselwirkung
7	Interessenausgleich

Wofür stehen die Schlüsselaspekte?

Physische Aspekte von Wasserstraßen betreffen die physischen Eigenschaften (Dimensionierung, Erscheinungsbild) und die physische Struktur der Wasserstraßen sowie die hydraulischen Verhältnisse.

Betriebliche Aspekte betreffen den Betrieb der Wasserstraße, wie Sicherheitsfragen, Verkehrsregeln, Betriebszeiten, Informationssysteme usw.

Wirtschaftliche Aspekte betreffen die wirtschaftlichen Kosten und Vorteile aller Verwendungen von Wasserstraßen.

Umweltaspekte betreffen die positiven oder negativen Auswirkungen auf die Umwelt, wie Auswirkungen auf das Klima, die Pflanzen- und Tierwelt, Lebensräume im Allgemeinen, geschützte Gebiete usw.

Soziale Aspekte betreffen die Auswirkungen auf die sozialen Bedingungen und das Wohlergehen der Menschen in Bereichen wie Beschäftigung, Sicherheit, Gesundheit und sozialer Zusammenhalt usw.

Wechselwirkung betrifft den wechselseitigen Einfluss von Vorteilen und Nachteilen, die sich aus den verschiedenen Wasserstraßenverwendungen ergeben, d. h. einander verstärkende, abschwächende oder gegenläufige Wirkung.

Interessenausgleich betrifft die bevorzugte Berücksichtigung bestimmter Verwendungen gegenüber anderen möglichen Verwendungen; hierzu zählen auch die Interessen der verschiedenen Interessenträger.

Die vorstehenden Aspekte sind als Checkliste für die Bewertung der verschiedenen Binnenwasserstraßennutzungen verwendet worden.

2.4 Beschreibung und Bewertung einer Wasserstraßennutzung: Freizeitschifffahrt

Im Folgenden wird die Methodik für die Beschreibung und Bewertung der Wasserstraßennutzung anhand des Beispiels der Freizeit- oder auch Sportschifffahrt dargestellt:

Zur Sportschifffahrt gehört eine große Vielfalt an wasserbasierten Aktivitäten, wie Bootfahren, Yachtsport, Segeln, Kanufahren, Surfen, Fischen, Rafting und Kitesurfen. Die Fahrgastschifffahrt, Flusskreuzfahrten und der Betrieb von Fähren können auch der Freizeitschifffahrt zugeordnet werden, sofern sie touristischen Zwecken dienen.
Das Befahren von Wasserstraßen zum eigenen Vergnügen, egal ob alleine oder in Gruppen, ist in vielen Ländern zu einem wichtigen Bestandteil des Lebensstils geworden - sowohl in Industrie- als auch in Entwicklungsländern. Der Umfang der Sportschifffahrt hat vornehmlich in den letzten Jahrzehnten zugenommen und sie hat einen wichtigen Wirtschaftszweig nach vorne gebracht.

Sportschifffahrt wird entlang großer Flüsse oder Kanäle (in Europa z. B. auf den Flüssen Rhein, Donau oder Rhone) betrieben, die in vielen Fällen intensiv auch für den Güterverkehr genutzt werden. Sportschifffahrt wird auch entlang kleinerer Wasserstraßen betrieben, die ursprünglich oftmals während der ersten industriellen Revolution (18. oder 19. Jahrhundert) für den Transport von Gütern genutzt wurden, auf denen heute aber keine Güter mehr transportiert werden.
So wurde der Ausbau der Sportschifffahrt wichtig für den Erhalt aber auch für die Wiederbelebung einiger dieser historischen Wasserstraßen. Beispiele hierfür sind das große Kanalnetz im Vereinigten Königreich, auf dem sogenannte Narrowboats (schmale Kanalboote) eingesetzt werden, sowie der Erie-Kanal in den Vereinigten Staaten und der Göta-Kanal in Schweden.
Zusammenfassend kann man sagen, dass sich die Sportschifffahrt für eine Vielzahl von wasserbasierten Aktivitäten eignet, die für die Binnenwasserstraßen und die umliegenden Gebiete Chancen bieten. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass Investitionen in Wasserstraßen für Freizeitzwecke oder in ergänzende landseitige Infrastruktur Auswirkungen haben, die möglicherweise zu gegenläufigen Interessen führen. Dies kann mit Hilfe der folgenden Schlüsselaspekte bewertet werden:

Physische Aspekte von Wasserstraßen: Große Wasserstraßen, auf denen Güter befördert werden, können auch für die Sportschifffahrt genutzt werden. Möglicherweise ist zusätzliche Ausstattung für die kleineren Boote erforderlich. Die Auswirkungen auf die Umgebung sind gering. Bei kleinen Wasserstraßen können Investitionen für bauliche Veränderungen der Größe oder Form des betroffenen Kanals erforderlich werden. Auswirkungen auf die Umgebung werden sich nicht vermeiden lassen, möglicherweise in Form der Schaffung einer unter technischen Gesichtspunkten entworfenen monotonen Wasserstraße.
Betriebliche Aspekte (Abbildung 1 und 2): Auf großen Wasserstraßen ist die Sportschifffahrt eine zusätzliche Nutzung, für die zusätzliche Ausstattung oder die Trennung der Verkehre aus Sicherheitsgründen erforderlich werden könnte. Auf kleineren Wasserstraßen, auf denen keine Güter befördert werden, wird für die Sportschifffahrt eine vollständige Betriebsausstattung, wie Schleusen, d. h. Selbstbedienungsschleusen mit allen erforderlichen Signalen und Zeichen, benötigt. Die Qualität der Ausstattung und die Zuverlässigkeit der Wasserstraße sind für ihre Attraktivität von entscheidender Bedeutung.

Abbildung 1 (links): Handelsschiff und Sportboote in derselben Schleusenkammer

Abbildung 2 (rechts): Selbstbedienungsschleuse an einer kleinen Wasserstraße, die nur für Freizeitzwecke genutzt wird. (Quelle: WSA Lauenburg)

Wirtschaftliche und soziale Aspekte: Die Sportschifffahrt ist dazu geeignet, die Entstehung von Unternehmen aus dem Bereich Bootsbau (Bau und Instandsetzung) oder Tourismus (Hotels, Restaurants, Campingplätze, Einkaufsbereiche) zu fördern und auf diese Weise die wirtschaftliche Entwicklung und durch die Schaffung von Arbeitsplätzen auch das gesellschaftliche Wohlbefinden zu verbessern. Vernachlässigte historische Wasserstraßen können wieder aufgebaut und schiffbar gemacht werden. Die gesamte Umgebung profitiert.
Umweltaspekte: Die Sportschifffahrt hat Auswirkungen auf die natürliche und die menschliche Umwelt. Die Baumaßnahmen zum Ausbau der Wasserstraße haben Auswirkungen auf die unmittelbare Umgebung. Durch die Schifffahrt selbst entstehen Abgase und Geräuschemissionen. Verlaufen solche Wasserstraßen durch geschützte Gebiete, ergeben sich für diese direkte Auswirkungen.
Wechselwirkung: Grundsätzlich gilt, dass - im Wege von Instandhaltungs- und Verbesserungsmaßnahmen - verbesserte Schifffahrtsverhältnisse auch mehr Schifffahrt anziehen. Somit verstärken diese Aspekte sich gegenseitig. Wie oben gezeigt, haben die Sportschifffahrt und die wirtschaftliche Entwicklung großes Potenzial, einander zu verstärken. Auf der anderen Seite aber haben die Sportschifffahrt und die Umwelt auch das Potenzial, miteinander in Konflikt zu geraten. Durch Nutzung des Umweltpotenzials - z. B. für touristische Zwecke - ist ein nachhaltiger Ausbau der Wasserstraße und der umliegenden Region allerdings sehr gut möglich.
Interessenausgleich: Die Sportschifffahrt kann Vorteile bedeuten, aber sie kann auch Folgen für die Menschen oder die Umwelt haben. Insofern können die diesbezüglichen Interessen, für die verschiedenen Interessenträger stehen, unterschiedlich oder sogar gegenläufig sein. Gemeinden und Unternehmen unterstützen die Schifffahrt häufig und erhoffen sich davon eine wirtschaftliche und gesellschaftliche Weiterentwicklung. Umweltschutzorganisationen, Aktivistengruppen oder Einzelpersonen können abweichende Interessen haben.

Ein richtiges Gleichgewicht zwischen diesen möglichen Interessen zu finden, ist von entscheidender Bedeutung für die erfolgreiche Entwicklung von Wasserstraßenprojekten. Zudem müssen all diese Interessen von Anfang an berücksichtigt werden, um Wasserstraßen auf nachhaltige Weise auszubauen.

In den nächsten zwei Kapiteln werden Werkzeuge vorgestellt, die verwendet werden können, und es wird erläutert, warum ein multifunktionaler Ansatz der beste Ansatz für Wasserstraßenbetreiber bzw. Entscheidungsträger ist.

3. Was bedeutet soziales und Umweltbewusstsein von Betreibern?

Der amerikanische Philosoph und Wissenschaftler Alfred Korzybski hat gesagt, „dass eine Karte nicht das Gebiet ist, das sie darstellt“. Wir können diesen Denkansatz leicht auf das Konzept der „nachhaltigen Entwicklung“ und der „sozialen Verantwortung von Unternehmen“ anwenden, da er von Mensch zu Mensch unterschiedlich verstanden wird. Weiterhin haben die Wörter „nachhaltig“, „Unternehmen“ und sogar „Verantwortung“, aus denen sich diese Konzepte zusammensetzen, nicht zwingend für jeden Menschen dieselbe Bedeutung, sondern hängen stark davon ab, wo dieser lebt (Bildungsstand, historische Entwicklung) sowie vom Wirtschaftssystem, das ihn bei seiner tagtäglichen Arbeit vorwiegend umgibt.

Um ein Missverständnis so weit wie möglich auszuschließen und als Einleitung zu diesem Beitrag, ist es wichtig, dem Leser zunächst klare Definitionen dieser Konzepte und Wörter an die Hand zu geben. Dies vermittelt dem Leser das Verständnis und die

Vision des Autors bezüglich dieses großen Themas sowie seiner Anwendung auf den Bereich der Binnenwasserstraßenverwaltung.

3.1 Einführung der in diesem Beitrag verwendeten Konzepte

Gemäß der Begriffsbestimmung in ISO26000 [1]:

- **Nachhaltige Entwicklung:** *„Entwicklung, die gegenwärtigen Bedürfnissen dergestalt Rechnung trägt, dass die Fähigkeit künftiger Generationen, ihre Bedürfnisse zu befriedigen, nicht gefährdet wird“*

- **Soziale Verantwortung:** *„Verantwortung einer Organisation für die Auswirkungen (positive wie negative) ihrer Entscheidungen und Aktivitäten auf die Gesellschaft und die Umwelt im Wege transparenten und ethischen Verhaltens, das:*

  – *zu einer nachhaltigen Entwicklung beiträgt, einschließlich der Gesundheit und des Wohlergehens der Gesellschaft;*

  – *die Erwartungen der Interessenträger berücksichtigt* ***(Einzelperson oder Gruppe, die ein Interesse an einer Entscheidung oder Aktivität einer Organisation hat);***

  – *geltendem Recht entspricht und im Einklang mit internationalen Verhaltensnormen steht und*

  – *in der gesamten Organisation eingeführt wird* ***(Einheit oder Gruppe von Personen und Einrichtungen mit einer Vereinbarung über die Verantwortlichkeiten, Befugnisse und Beziehungen und bestimmbare Ziele)*** *und in deren Beziehungen Anwendung findet.“*

In Übereinstimmung mit dieser Begriffsbestimmung hat die EU-Kommission die soziale Verantwortung von Unternehmen (Corporate Social Responsibility, CSR) definiert als „Verantwortung von Unternehmen für ihre Auswirkungen auf die Gesellschaft“ [3].

Das Konzept der „sozialen Verantwortung von Unternehmen“ besteht aus drei ausgewogenen Wörtern, von denen jedes wichtig ist:

- ***Unternehmen:*** Nach ISO26000 und unserem Verständnis erfasst das Wort „Unternehmen“ alle Organisationen (gleich, ob privat oder öffentlich), die mit ihren Aktivitäten im Rahmen ihrer Möglichkeiten Einfluss auf eine nachhaltigere Entwicklung unserer Gesellschaft nehmen können. Über diese Begriffsbestimmung hinaus erfasst der Begriff „Unternehmen“ auch die für die Binnenwasserstraßen zuständigen öffentlichen Stellen, da diese die Aufgabe haben, die Binnenwasserstraßen und -anlagen zu überwachen und verwalten und zudem ganz eindeutig eine große Rolle bei der nachhaltigen Entwicklung der Binnenwasserstraßen spielen.

- ***Sozial:*** Im Kontext von CSR für Unternehmen kann dieser Begriff sich auf die Beziehung zwischen dem Unternehmen und seinen Mitarbeitern beziehen. Das Konzept „sozial“ ist allerdings viel umfassender. Hier muss der Begriff „sozial“ als Konzept verstanden werden, das alle sozialen Dimensionen umfasst, die mit der nachhaltigen Entwicklung der uns umgebenden Welt im Zusammenhang stehen.

- ***Responsibility (Verantwortung):*** Es ist erforderlich zwischen dem „lateinischen“ und „angelsächsischen“ wirtschaftlichen und kulturellen Ansatz zu unterscheiden. Beim „angelsächsischen Ansatz“ bezieht sich das Wort „Responsibility“ eher auf „Accountability“ (Verantwortung im Sinne der Möglichkeit zur Rechenschaft gezogen zu werden). Bei dieser Bedeutung wird CSR aus einem begrenzten Blickwinkel betrachtet, da die Unternehmen nur vom Eigentümer des Unternehmens zur Rechenschaft gezogen werden können. Beim „lateinischen“ Ansatz kann das Word „Responsibility“ für Verantwortung (im Sinne einer nicht verbindlichen Verpflichtung: d. h. die Verpflichtung des Unternehmens etwas für eine nachhaltigere Entwicklung zu tun) stehen oder für „Accountability“ (die Verpflichtung eines Unternehmens etwas zu tun und die Möglichkeit, es für die Folgen seines Handelns zur Rechenschaft zu ziehen). Nach der Begriffsbestimmung der EU-Kommission muss das Wort „Responsibility“ wie folgt verstanden werden:
  - Befolgung der Gesetze;
  - Integration sozialer, umwelttechnischer, ethischer sowie verbraucher- und menschenrechtsbezogener Gesichtspunkte in ihre Geschäftsstrategie und Geschäftstätigkeit. Der Ansatz der EU-Kommission liegt näher am „lateinischen“ Ansatz als am angelsächsischen. In dem vorliegenden Dokument verwenden wir diese Begriffsbestimmung.

Tatsächlich baut CSR auf sieben ISO 26000-Prinzipien auf:

- ***Accountability:*** Eine Organisation soll für die Auswirkungen, die sie auf die Gesellschaft, die

Wirtschaft und die Umwelt hat, zur Rechenschaft gezogen werden können. Diese „Accountability“ beschränkt sich jedoch auf:

- „die Folgen ihrer Entscheidungen und Aktivitäten für die Gesellschaft, die Umwelt und die Wirtschaft, insbesondere erhebliche negative Konsequenzen;
- die Maßnahmen, die ergriffen werden, um die Wiederholung unbeabsichtigter und unvorhergesehener negativer Folgen zu verhindern“ [1]

- ***Transparenz:*** „Eine Organisation soll in ihren die Gesellschaft und Umwelt betreffenden Entscheidungen und Aktivitäten transparent sein“ [1]. Es erscheint offensichtlich, dass der Grundsatz der Transparenz eine der Grundlagen der CSR-Prinzipien ist, da er der Organisation erlaubt, ihr eindeutiges Engagement dafür zu zeigen, entsprechend ihrer Möglichkeiten an der globalen nachhaltigen Entwicklung teilzunehmen.
- ***Ethisches Verhalten:*** Ethisches Verhalten zeigt sich in den von der Organisation geförderten Werten und in der Art und Weise, wie sie diese lebt - d. h. in ihrer Organisationsführung (Governance).
- ***Achtung der Interessen der Interessenträger:*** „Eine Organisation soll die Interessen ihrer Interessenträger achten, berücksichtigen und auf diese eingehen“. Bei einer öffentlichen Organisation bedeutet dies, das richtige Gleichgewicht zwischen verschiedenen Interessen zu finden und auf eine nachhaltigere Entwicklung hinzuarbeiten.
- ***Achtung der Rechtstaatlichkeit:*** Dieses Prinzip ist natürlich zwingend einzuhalten und für eine öffentliche Organisation mit Zuständigkeit für die Verwaltung der Binnenwasserstraßen eine Selbstverständlichkeit.
- ***Achtung internationaler Verhaltensnormen:*** Wenn es keine lokalen Normen gibt oder diese unterhalb des von internationalen Normen geforderten Niveaus liegen, soll die Organisation danach streben, solche internationalen Verhaltensnormen so weit wie möglich einzuhalten.
- ***Achtung der Menschenrechte:*** Dieses Prinzip ist natürlich zwingend einzuhalten und für eine öffentliche Organisation mit Zuständigkeit für die Verwaltung der Binnenwasserstraßen eine Selbstverständlichkeit.

3.2 Verhältnis zwischen nachhaltiger Entwicklung und der sozialen Verantwortung von Unternehmen

Nach den vorstehenden Begriffsbestimmungen ist „nachhaltige Entwicklung“ auf globaler und makroökonomischer Ebene [2] zu verstehen. Nachhaltige Entwicklung ist ein globales Ziel, das jedes Land in seiner Entwicklung verfolgen soll (dies ist eine der Ideen der COP 21 von Paris).

Hauptziel der nachhaltigen Entwicklung ist eine weltweite nachhaltige Entwicklung. Ausgehend von dieser Annahme bedeutet das nicht, dass die Organisation, die CSR einführt, das Ziel hat, eine nachhaltige Organisation zu sein.

Die soziale Verantwortung von Unternehmen ist auf der Organisationsebene (mikroökonomische Ebene) angesiedelt. Eine Organisation, die CSR einführt, trägt zur weltweiten nachhaltigen Entwicklung bei, da die Organisation die wirtschaftlichen, sozialen und umweltbezogenen Konsequenzen ihrer Entscheidungen sowie ihre strategische Entwicklung und ihr Management berücksichtigt. Weiterhin zeigt eine Organisation, die die CSR-Konzepte einführt, dass ihr die Auswirkungen, die sie entsprechend ihres Gewichts auf die Gesellschaft hat, bewusst sind und zeigt ihre Bereitschaft, die Folgen ihrer Aktivitäten für die Gesellschaft zu berücksichtigen, sowie ihr Bestreben, ihre Aktivitäten global auf eine nachhaltige Entwicklung auszurichten.

3.3 Weshalb das CSR-Konzept heute so wichtig ist

Die Idee einer nachhaltigen Entwicklung entstand schrittweise während der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg. Während dieses Zeitraums kam es in der Mehrzahl der Industrienationen zu einem starken Wachstum. Am Ende der 1960er Jahre stellte eine Gruppe von Wissenschaftlern (genannt der „Club of Rome“) die Frage nach den Folgen dieses Wachstums für unseren Planeten und seine Bewohner.

Dies führte zum Meadows-Bericht mit dem Titel „Die Grenzen des Wachstums“ von 1972. Auf der Grundlage von mit Computermodellen durchgeführten Simulationen wurden die möglichen Konsequenzen der Weiterentwicklung der menschlichen Bevölkerung im Hinblick auf die Ausbeutung der natürlichen Ressourcen bis etwa zum Jahr 2100 simuliert. Der Bericht ergab, dass das Wirtschaftswachstum bis 2100 aufgrund von Umweltverschmutzung, der Verarmung von Ackerland bzw. der Erschöpfung fossiler Brennstoffe zu einem drastischen Bevölkerungsrückgang führen würde.

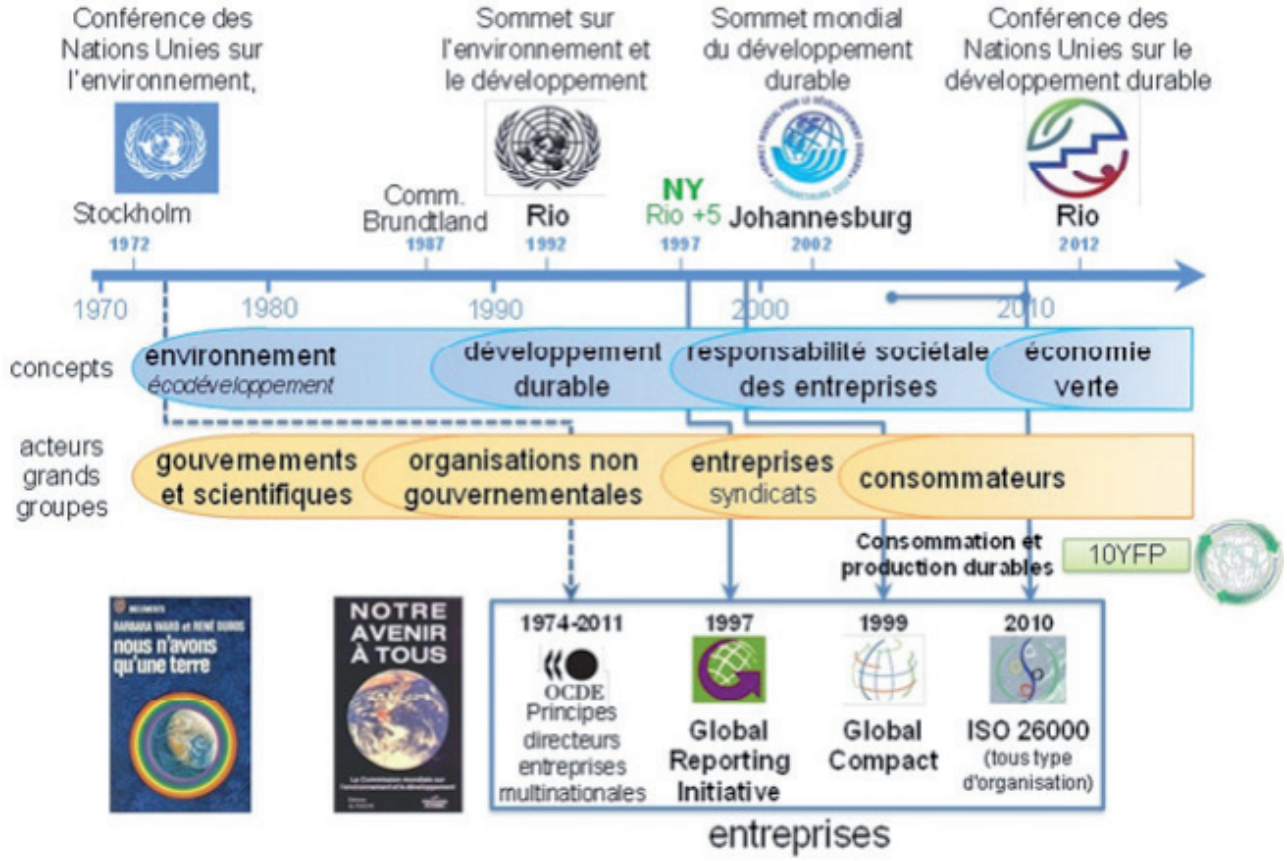
Im Jahr 1972 behandelte die Konferenz der Vereinten Nationen über die menschliche Entwicklung in Stockholm die ökologische Entwicklung, die Wechselwirkungen zwischen Ökologie und Wirtschaft sowie die Entwicklung der südlichen und nördlichen Länder. Das war der erste Schritt in Richtung der Vision einer stärker in die vorhandene Umwelt integrierten Wirtschaft.

Im Jahr 1987 schlug die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (Brundtland-Bericht) eine Begriffsbestimmung für „nachhaltige Entwicklung“ vor; diese wurde oben genannt. Der Bericht zeigt, dass eine „nachhaltige“ Zukunft nur denkbar ist, wenn wir in der Gegenwart handeln.

Im Jahr 1992 ging aus dem dritten Weltumweltgipfel in Rio de Janeiro die Agenda 21 (21 Maßnahmen als Bekenntnis zur Einführung einer nachhaltigen Entwicklung) hervor. Die Begriffsbestimmung von „nachhaltiger Entwicklung“ umfasste „drei Säulen“, die miteinander in Einklang gebracht werden müssen: wirtschaftlicher Fortschritt, soziale Gerechtigkeit und Umweltschutz.

2005: In diesem Jahr trat das Kyoto-Protokoll zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Europäischen Union und zur Schaffung eines Bewusstseins für die Auswirkungen lokal erzeugter Gase auf unseren Planeten in Kraft.

2015: Auf dem Cop 21 in Paris wurden Ziele zur Begrenzung des Temperaturanstiegs auf unserem Planten festgelegt, um künftige Generationen und ihr Lebensumfeld zu erhalten. Die Konferenz war ein Erfolg, da ihr Ergebnis zum ersten Mal nicht in einem Messwert bestand, den die verschiedenen Länder erreichen mussten. Dieses Mal musste jedes Land einen Vorschlag für seinen Beitrag zu einer nachhaltigeren Entwicklung und für die Begrenzung des Klimawandels (der weltweite Anstieg der Temperatur auf unserem Planeten infolge des Verbrauchs fossiler Energie) machen.



Parallel zu dieser historischen Entwicklung nehmen wir ein globales Bewusstsein wahr (und zwar dafür, dass die Handlungen einiger sich auf die Handlungen anderer auswirken und dass nachhaltige Entwicklung weltweit verstanden werden muss). Dieses globale Bewusstsein, das seinen Ursprung in einer Gruppe von einigen Wissenschaftlern (dem „Club of Rome“) hatte, trat zunächst in großen internationalen Organisationen auf und erreichte schrittweise die Regierungen, Unternehmen (durch CSR) und schließlich Einzelpersonen.

Bei öffentlichen oder privaten Unternehmen spiegelt sich dies im Konzept der „Verantwortung für Gesellschaft und Umwelt“ von Unternehmen im weitesten Sinne wieder; ein Konzept, das immer wichtiger wird. Mit anderen Worten - es ergibt sich für sie die Frage, wie öffentliche oder private Unternehmen entsprechend ihrer Möglichkeiten in einem globalen Prozess (wirtschaftlich, gesellschaftlich und umweltbezogen) hin zu einer „nachhaltigeren“ Entwicklung handeln.

Zusammenfassend besteht das Ziel der Einführung des Konzepts der sozialen Verantwortung in einer Organisation darin, dass diese im Rahmen ihrer Möglichkeiten zu einer besseren weltweiten nachhaltigen Entwicklung beiträgt.

Über die erwarteten Ergebnisse der Einrichtung eines CSR-Prozesses in einer Organisation hinaus ist die Steigerung des Bewusstseins durch den CSR-Ansatz eine fantastische Triebfeder, die große Veränderungen in einer Organisation in Richtung einer nachhaltigeren Entwicklung ermöglicht.

4. Warum brauchen Entscheidungsträger und Ingenieure CSR sowie einen multifunktionalen Ansatz?

4.1 Unternehmerischer Ansatz in öffentlichen Stellen mit Zuständigkeit für die Binnenwasserstraßen

Als Garanten für das öffentliche Wohlergehen haben Behörden möglicherweise eine Vorbild- oder sogar Wegbereiterfunktion, wenn es um den unternehmerischen Ansatz geht. In ihrem Bemühen um die Interessen aller übertragen sie in vielen Ländern dieses Bewusstsein auf die Regelungsebene, auf die gesellschaftlichen Ausrichtungen (die sie anstoßen) sowie durch die Art und Weise, wie sie sie umsetzen.
Weiterhin kann das für die Binnenwasserstraßen zuständige Ministerium, anders als andere Teile der öffentlichen Verwaltung (wie das Justizministerium), unmittelbar auf eine nachhaltige Entwicklung Einfluss nehmen. Über ihre Entscheidungen und Maßnahmen kommt Betreibern von Binnenwasserstraßen eine zentrale Rolle für eine nachhaltigere Entwicklung zu. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Interessen der Gesellschaft als Ganzes und auf lange Sicht sind Betreiber von Binnenwasserstraßen in der Lage, die zur Anwendung vorgesehene Lösung nachhaltiger auszurichten: z. B. wird ein neues Dock nicht mehr nur als wirtschaftliches Werkzeug gesehen, sondern es wird auch umweltbezogenen und gesellschaftlichen Auswirkungen auf lokaler und globaler Ebene Rechnung getragen.

Eine neue Denk- und Arbeitsweise berücksichtigt die Nutzen, die Binnenwasserstraßen haben, sowie ihre Folgen für die o. g. technischen, wirtschaftlichen, umweltbezogenen und sozialen Aspekte.

Basierend auf dieser Annahme fällt die Stelle, die für die Binnenwasserstraßen zuständig ist, unter den Begriff „Unternehmen“.

Tatsächlich machen immer mehr Stellen mit Zuständigkeit für Binnenwasserstraßen die drei Säulen von CSR (sozial, umweltbezogen und wirtschaftlich) zum Bestandteil ihrer Projekte und ihres Handelns. Obgleich dieser Trend ausgeprägt ist, ist er nicht überall vorhanden und einige Behörden arbeiten in fachlicher Hinsicht immer noch auf herkömmliche Weise.

Einige Beispiele dafür, wie Ingenieure und Entscheidungsträger einen multifunktionalen Ansatz im Rahmen ihrer Verwaltungsaufgaben berücksichtigen, werden nachstehend aufgeführt.

4.2 Einige Beispiele für einen unternehmerischen Ansatz in Stellen, die für die Binnenwasserstraßen zuständig sind

Alle im Folgenden aufgeführten Beispiele stammen aus jüngeren Projekten unter Leitung der für die wallonischen Binnenwasserstraßen zuständigen Behörde (der „Service Public de Wallonie“).

Die Wallonie ist der südliche Teil der föderalen Monarchie Belgien. Bedingt durch den Aufbau des belgischen Staats haben die dezentralen Behörden die volle Verantwortung für die Verwaltung und den Betrieb des Binnenwasserstraßennetzwerks; für die Wallonie heißt das 451 km schiffbare Flüsse und Kanäle mit 80 Schleusenstandorten (von den einige mehr als eine Schleuse haben), 5 Schiffshebewerke und ein Schräghebewerk.

Der größte Teil des Netzwerks ist in Kategorie IV eingestuft, aber die Kommunalverwaltung hat einen großen Investitionsplan zum Ausbau des Netzes auf Kategorie Va oder höher genehmigt (die Maas bis auf Kategorie VI und einige weitere Abschnitte auf Kategorie Vb). Dieser übergreifende Ausbauplan begann ungefähr 2005 und soll bis etwa 2025 abgeschlossen sein. Das gesamte Netzwerk (Kategorie IV und höher) ist Teil des Transeuropäischen Verkehrsnetzes (TEN-V) und insbesondere des multimodalen Korridors Nordsee – Mittelmeer. Im westlichen Teil von Wallonien sind die Projekte (hauptsächlich im Hinblick auf das Schelde-Becken) in das übergreifende europäische Binnenwasserstraßenprojekt Seine-Schelde integriert, das darauf ausgerichtet ist, die Verbindung des Seine-Beckens mit dem Norden Frankreichs und darüber hinaus mit Belgien und den Niederlanden zu verbessern.

Beispielhaft werden drei interessante Projekte vorgestellt:

- Der Ausbau der Schelde im Bereich der Stadt Tournai (Kategorie IV auf Va)

- Der Bau einer Marina im Zentrum der Stadt Charleroi als Teil eines übergreifenden urbanen Projekts.
- Die Erneuerung der Kais entlang der Maas in der Stadt Dinant.

4.2.1 Die Schelde in Tournai

Die Schelde wie sie heute durch Tournai fließt ist ein kanalisierter Fluss, der an einigen Stellen wirklich sehr schmal ist, was das Befahren mit Schiffen schwierig, unangenehm und gefährlich macht: Unter einer Traditionsbrücke beträgt die Breite 12 m und es gibt scharfe und enge Kurven mit einer Minimalbreite von 19 m. Die Notwendigkeit von Verbesserungen ist in Anbetracht des gegenwärtigen und erwarteten Verkehrs offensichtlich. Darüber hinaus ist der Fluss ein wahrer Flaschenhals für das Seine-Schelde-Projekt.

Im Zuge der Verbreiterungsarbeiten, die im historischen Teil der Stadt stattfinden, war besondere Vorsicht von den ersten Schritten der Studien an die Regel, um den Befindlichkeiten der Bewohner und Lokalpolitiker Rechnung zu tragen. Seitens der Ingenieure und Entscheidungsträger war von Anfang an beabsichtigt, das Projekt nicht nur mit einem herkömmlich wirtschafts- und technikorientieren Ansatz anzugehen, sondern auch in einen übergreifenden Ansatz einzubetten, der Kultur- und Naturerbestätten sowie soziale und umweltbezogene Aspekte berücksichtigt.

Die Vorstudien führten zu einer Lösung, aus der ein übergreifendes städtisches Projekt entsteht. Die Umgestaltung des Flusses wurde ausgedehnt, um die umgebenden Flächen aufzuwerten, wobei die Wasserinfrastrukturarbeiten genutzt wurden, um die Umgebung entlang des Flusses umzugestalten. Die Sportschifffahrt wurde nicht vergessen; es wurde spezielle Infrastruktur und die Möglichkeit, in Zukunft eine Marina im Bereich eines Parks anzulegen, vorgesehen. Besondere Aufmerksamkeit wurde den Kultur- und Naturerbestätten (unter ihnen die symbolträchtigen Orte der Stadt) gewidmet: Mehrere Ausschüsse wurden eingerichtet, um das Projekt zu begleiten und um dabei zu helfen, die am besten geeignete Lösung zu finden. Weiterhin wurden die Einwohner gebeten, ihre Vorschläge und Präferenzen im Wege einer Befragung mitzuteilen.

Ebenso wurde bei der Erstellung der Ausschreibungsunterlagen verfahren. Ein derart sensibles Projekt bot die Gelegenheit, ein alternatives Ausschreibungsverfahren festzulegen. Der Preis war nicht das einzige Kriterium für die Wahl des Auftragnehmers. Mehrere Kriterien wurden berücksichtigt, darunter die Nutzung der Wasserstraße zur Beförderung der Baustoffe, die tägliche Organisation der Arbeiten und die Aufmerksamkeit, die der Begrenzung von Beeinträchtigungen der Bewohner geschenkt wurde, die Begrenzung der Folgen für die städtische Mobilität, die durch die Arbeiten oder durch den mit diesen Arbeiten zusammenhängenden Verkehr entstehende Verschmutzung, die Dauer der Arbeiten, ... Während der Arbeiten wurde eine spezifische Kommunikation eingerichtet, um zu erläutern, was geschieht und welche Gründe die Arbeiten und die zusätzlichen Verbesserungen haben.

4.2.2 Die Marina in Charleroi

Charleroi ist eine der wichtigsten historischen Industriestädte in Wallonien. Die Stahlkrise und die Schließung der Kohlegruben haben in den letzten Jahrzehnten jedoch zu einer schwierigen wirtschaftlichen Lage geführt. Um die lokale Wirtschaft wieder anzukurbeln und die Stadt erneut attraktiv zu machen, haben die lokalen Entscheidungsträger mit einem ehrgeizigen Plan begonnen, der das Ziel hat, das Stadtzentrum mit Hilfe öffentlicher und privater Investitionen neu zu gestalten.

Mehrere Projekte betreffen die Sambre, bei der es sich um einen Nebenfluss der Maas handelt, und ihre nähere Umgebung. Der Fluss fließt am Stadt-

zentrum entlang. Er ist in Kategorie IV eingestuft und wird im Laufe der nächsten Jahre auf Va ausgebaut. In den letzten Jahren nutzten die Binnenwasserstraßenbehörden größere Kaimauerinstandhaltungsmaßnahmen, um die Kais auf der Stadtseite umzubauen: Neue Fußgängerzonen wurden geschaffen und alte Gebäude saniert. Auf der gegenüberliegenden Seite wurde der Bahnhofsbereich saniert und mit einem neuen Platz, neuen Bahnhöfen für Stadtbahn und Busse, einem multimodalen Verbindungszentrum usw. ausgestattet.

Der nächste Schritt ist ein Projekt im Rahmen einer öffentlich-privaten Partnerschaft in der Nähe des Flusses, das den Bau von Apartments hohen und mittleren Preisniveaus zum Ziel hat. Hauptbestandteil des Projekts ist eine mit dem Fluss verbundene Marina. Die Marina soll ein hochattraktiver Ort sein, der die Stadt noch enger mit ihrem Fluss verbindet und so den Tourismus fördert und einen Mehrwert für die hier entstehenden Immobilien schafft.

Hierdurch dehnen die örtlichen Behörden dank der ÖPP und mit Hilfe der Region die Strategie rund um den Fluss aus. Die regionale Binnenwasserstraßenbehörde spielt eine wichtige Rolle: Ihre Ingenieure leisten Unterstützung bei den technischen Aspekte und der Binnenwasserstraßenhaushalt wird genutzt, um eine hochwertige Ausstattung entlang des Flusses zu fördern.

4.2.3. Die Kais der Maas in Dinant

Dinant ist eine historische und touristische Stadt an der Maas nahe der französischen Grenze. Dennoch - und trotz des hohen Tourismuspotenzials - litt die Stadt unter der unzureichenden altmodischen Ausstattung entlang des Flusses: Die Kais waren zu schmal und unkomfortabel und wurden mit Autos befahren, als die Terrassen zwischen der Autospur und den alten für Erholungszwecke genutzten Uferdämmen lagen.

Auch hier nutzten die Binnenwasserstraßenbehörden erforderliche umfangreiche Instandhaltungsarbeiten, um das gesamte Gebiet entlang des Flusses aufzuwerten. Die Kais wurden vergrößert und überragen nun das Flussufer. Neue Dämme wurden gebaut und der Raum für die Terrassen bietet nun, da die Spur breiter und besser vom Bereich der Terrassen getrennt ist, mehr Komfort und ist attraktiver für Fußgänger und Touristen.

Die Bauphase war komplex - nicht nur weil die Arbeiten in einem sensiblen städtischen Bereich erfolgten: Die touristischen Wirtschaftsgüter müssen im Frühling und Sommer geschützt werden. Die Zusammenarbeit zwischen den Ingenieuren und Technikern (Binnenwasserstraßenbehörde, lokale Straßenverkehrsbehörde, Facility-Manager, ...) auf der einen und den Lokalpolitikern und Tourismusanbietern auf der andere Seite war ganz eindeutig das Schlüsselelement für ein erfolgreiches Projekt. Die Stadt und ihr Bürgermeister haben vor Ort aktiv mitgewirkt. Mit diesem Projektziel haben sie die Gelegenheit, die Stadt zu fördern. Beispielsweise verwenden sie heute den Namen „La Croisette“ (als Hinweis auf die bekannte Uferpromenade in Cannes) für die neugestalteten Kais entlang der Maas.

4.3. Einige abschließende Anmerkungen

Wie die vorstehenden Beispiele zeigen, entwickelt sich derzeit ein neuer Trend, der sich dann zeigt, wenn Binnenwasserstraßenbehörden über Instandhaltungs- bzw. Aufwertungsmaßnahmen nachdenken. Der herkömmlich technische Ansatz wird heute erweitert und in einen kooperativen Ansatz umgewandelt, bei dem alle Interessenträger teilnehmen, um einen Konsens zu finden und bei den Projekten - sowie letztlich für die Wasserstraße selbst - einen gesellschaftlichen Mehrwert zu generieren.

5. Zusammenfassung

Dieser Beitrag vermittelt eine Vorstellung davon, warum der Betrieb, die Instandhaltung bzw. der Ausbau von Binnenwasserstraßen auf nachhaltige Weise für Binnenwasserstraßenbetreiber erforderlich ist. Angesichts der Vielzahl von Verwendungen bzw. Funktionen - d. h. der Multifunktionalität - von Binnenwasserstraßen, wie in Kapitel 2 erläutert, liegt das breite Interesse seitens der Gesellschaft, der Organisationen und der Einzelpersonen an diesen Wasserstraßen auf der Hand. Dieses Bewusstsein erfordert einen umfassenden Ansatz bezüglich aller Arten von Aktivitäten im Zusammenhang mit der Verwaltung von Wasserstraßen. Das in Kapitel 3 erläuterte Konzept der „sozialen Verantwortung von Unternehmen“ erklärt die Grundlagen und bietet allgemeine Leitlinien für ihre Anwendung. Beispiele für erfolgreiche auf unternehmerische Weise realisierte Projekte sind in Kapitel 4 enthalten.

Die Aufgabe der neuen Arbeitsgruppe wird sein, all dieses Wissen zu nutzen und aufzunehmen, um einen Leitfaden für Binnenwasserstraßenbetreiber zur Verfügung zu stellen. Erfahrungswerte anderer Wasserstraßenexperten werden gerne entgegengenommen.

6. Literatur

PIANC (2016) Final report “Values of Inland Waterways”, PIANC, Brussels

ISO 26000:2010 (E), « Guidance on social responsibility » - ISO/TMB Working Group on Social Responsibility

CAPRON M. and QUAIREL-LANOIZELEE F. (2016), « La responsabilité sociale d’entreprises », Editions La Découverte, Paris pp 5-28

UE Commission: http://ec.europa.eu/growth/industry/corporate-social-responsibility_en

BERGER A., de PERTHUIS C., PERIN N., (2014), « Le développement durable », Nathan, Paris

Binnenschifffahrtsinformationsdienste (RIS) in Deutschland

von Nils Braunroth[1], Wieland Haupt[2]

Kurzfassung

Seit den ersten Initiativen der Europäischen Kommission zu Binnenschifffahrtsinformationsdiensten hat dieser Rahmen für den Informationsaustausch zur Unterstützung von Verkehrs- und Transportverwaltung in der Binnenschifffahrt seinen Weg weltweit gefunden.

Die PIANC RIS-Richtlinien sind die Basis für die RIS-Richtlinien wie von der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (CCNR) und der Europäischen Kommission formell anerkannt wurden. Die CCNR hat die Entwicklung der technischen Standards bis zum heutigen Tag unterstützt. Seit 2005 ist die Entwicklung der technischen Aspekte der Binnenschifffahrtsinformationsdienste durch die Europäische Kommission reguliert worden.

Binnenschifffahrtsinformationsdienste wurden formell als ein Konzept für harmonisierte Informationsdienste zur Unterstützung von Verkehr und Transportverwaltung in der Binnenschifffahrt anerkannt; einschließlich der Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern.

Der zusätzliche Wert von Binnenschifffahrtsinformationsdiensten hat weltweit Anerkennung gefunden.

Die Standards von Inland ECDIS, Elektronische Schiffsmeldung, Schiffsverfolgung und -identifikation und Nachrichten für die Binnenschifffahrt wurden veröffentlicht und die Expertengruppen haben an Verbesserungen und der Entwicklung neuer Aspekte für die nächsten Versionen gearbeitet.

Verkehr und Transportverwaltung in einem Transportkorridor benötigen einen integrierten Netzwerkansatz in dem die Informationsdienste für die Nutzer ein interaktiver Teil von Reise- und Verkehrsplanungsprozessen sind. Durch RIS ermöglichte Korridorverwaltung zur Unterstützung der Verkehrsverwaltung wird mehr und mehr ein wesentlicher und eindeutiger Teil von RIS.

1 Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur Bonn, Deutschland, Stellvertretender Leiter der Abteilung “Wasserstraßen-Infrastruktur, RIS“, nils.braunroth@bmvi.bund.de

2 Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, Deutschland, Leiter der Fachstelle für Geoinformationen Süd (FGS), wieland.haupt@wsv.bund.de

Die letzten Jahre waren sehr angefüllt. Es ist daher interessant Bericht zu geben über den Stand von RIS in Deutschland, was in den letzten Jahren passiert ist, was gerade läuft und welche Strategie bezüglich RIS in der Zukunft verfolgt wird.

1. Einführung

Flussinformationsdienste (RIS) ist ein Sammelbegriff für ein Paket von Diensten: Fahrrinneninformationsdienste, Verkehrsinformation und Verkehrsverwaltungsinformation, Informationsunterstützung bei Unfallmanagement, transportbezogene Dienste als auch Dienste für Wasserstraßen- und Hafengebühren. Verschiedene RIS-Funktionen und manchmal auch RIS-Unterfunktionen sind für einzelne Dienstleistungen verfügbar. RIS kann gemäß den Bedürfnisse und verfügbaren Mittel umgesetzt werden. Es ist gleichermaßen möglich eine einzelne RIS-Funktion oder Unterfunktionen als auch ganze Dienste zu realisieren.

Verschiedene RIS können auf der Basis einer Anzahl existierender RIS-Dienste umgesetzt werden. Solche Dienste sind visuelle oder radarreflektierende Navigationssignale, Lichtsignale, Mobilfunk (Sprache und Daten), GNSS zur Schiffspositionierung, UKW-Radio, Internet, Radarinstallationen auf Schiff oder an Land, CCTV-Kameras an Land, elektronische Navigationskarten (IENC), Schiffsmeldesysteme oder Schiffsverfolgungs- und –identifikationssysteme an Binnenwasserstraßen (Inland AIS).

Unsere Präsentation wird einen Überblick der aktuellen RIS-Projekte und unsere künftige Strategie geben:

- Durchführung von AIS auf den Hauptwasserstraßen des deutschen Binnenwasserstraßennetzes und Beispiele für die Nutzung von Inland-AIS an Bord von Schiffen als auch bei Anwendungen vor der Küste
- Pilotprojekt Schleusenmanagement und Durchführung an den Hauptwasserstraßen
- ELWIS (Elektronischer Wasserstraßen-Informationsservice), das internetbasierte Fahrrinneninformationsportal der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung)
- Sicherheit im Schiffsverkehr, verbessert durch AtoN
- Perspektiven für die nahe Zukunft

2. Aktuelle Projekte

2.1 Umsetzung AIS-Infrastruktur

Im Anschluss an die Entwicklungen der Seeschifffahrt entwickelte Europa den sogenannten Inland

AIS, der den spezifischen Bedürfnissen der Binnenschifffahrt dient und dabei die Kompatibilität mit dem maritimen AIS wahrt. Europäische Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltungen bereiten in enger Zusammenarbeit mit den Flusskommissionen die vorgeschriebenen Ausrüstungspflicht für Inland AIS auf europäischen Wasserstraßen vor oder haben bereits die entsprechenden Vorschriften auf ihren Wasserstraßen eingeführt.

Seit Dezember 2016 ist die Verwendung von Inland AIS und Inland ECDIS für alle Wasserstraßen der Klasse IV und darüber als auch für ausgewählte Wasserstraßen der Klasse III in Deutschland vorgeschrieben. Die Ausrüstung an Bord ermöglicht die gegenseitige Erkennung, Identifizierung und Darstellung von nahen Schiffen und ihres Kurses auf einer elektronischen Navigationskarte. Die Nutzung dieser Systeme unterstützt die Navigation an Bord und verringert das Risiko von Havarien; somit erhöht sie die Sicherheit und Benutzerfreundlichkeit der Navigation und trägt zur Effizienz und Attraktivität der Binnenschifffahrt bei.

In den letzten Jahren hat die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung zusätzliche landseitige AIS-Infrastruktur entlang ausgewählter Wasserstraßen aufgebaut. Heute sind insgesamt 3600 km Binnenwasserstraßen mit landseitiger AIS-Infrastruktur abgedeckt.

Parallel zum physischen Aufbau von Infrastruktur ist die Gesetzgebungsverfahren zur Annahme der gesetzlichen Grundlage zur Verarbeitung von AIS-Daten mit der Annahme der 3. Änderung zum Binnenschifffahrtsgesetz (Bundeskompetenz) am 5. Mai 2017 in Kraft getreten.

2.2 Pilotprojekt Schleusenmanagement und Anwendung an den Hauptwasserstraßen

Um eine schnellen Schleusenbetrieb zu gewährleisten sollten die Schleusenvorgänge durch Minimierung der Wartezeiten für Schiffe optimiert werden. Es ist daher notwendig z.B. einen Überblick über die Position der Schiffe und ihrer Fahrtrichtungen zu haben. Ausgehend von der Frage einer optimalen Reihenfolge für eine spezielle Schleuse z.B. an der Donau sollte diese Frage auf eine Kette von Schleusen an der Donau erweitert werden. Ein vorhandenes elektronisches Transport-Tagebuch ist zur Weiterentwicklung vorgesehen. Der Ziel dieses Projekts ist es, ein neues Konzept für Schleusenmanagement mit einem elektronischen Transport-Tagebuch zu entwickeln, das die Inland AIS-Ausrüstung verwendet und den Test und Umsetzung an der Donau Mitte 2018 durchführt. Die Hauptaufgabe in der Entwicklung war die Verwendung von AIS-Daten wie Positionsmeldungen und Schiffsdetails. Eine Konsequenz ist dass die Dokumentation zuverlässiger und virenfrei wird. Die statistische Ausgabe wird vereinfacht und standardisiert. Das Transport-Tagebuch ist ein offizielles Dokument und muss entsprechend behandelt werden. Das Pilotprojekt sollte nach seiner Validierung an allen anderen Schleusen an den Binnenwasserstraßen eingesetzt werden.

2.3 ELWIS (Elektronischer Wasserstraßen-Informationsservice)

ELWIS (Elektronischer Wasserstraßen-Informationsservice) ist seit 1999 das internetbasierte Fahrrinneninformationsportal der WSV gewesen. Damals war der Dienst darauf ausgelegt, verkehrsbezogene Informationen an Schiffsführer auf den Binnenwasserstraßen zu liefern, um die Sicherheit und Leichtigkeit der Binnenschifffahrt zu verbessern und die Reiseplanung zu unterstützen.

ELWIS ist akzeptiert und im Schifffahrtssektor weit verbreitet (siehe **Abbildung 1**).

2017 wurden 32,3 Millionen Seiten in ELWIS geöffnet.

ELWIS-ABO ist ein spezieller, zusätzlicher Dienst der kostenpflichtige Informationen bereitstellt. Die Abonnenten müssen sich für diesen Dienst registrieren und angeben, welche Art von Informationen sie erhalten wollen (wie Wasserstände an bestimmten Pegeln, Hochwasser/Niedrigwasser-Prognosen, Nachrichten für die Binnenschifffahrt, oder Eisberichte) und eine Versandart (Email oder SMS) wählen. Die Information kann automatisch oder bei Schadensfällen erhalten werden. 2107 wurden mehr als 3,8 Millionen Emails auf Basis von ELWIS-Abonnements versandt. Die Verfügbarkeit des Systems betrug 99,96 %.

Seit 2011 sind einige Verbesserungen umgesetzt worden. Im Moment ist eine strecken- und kartenbasierte Suchfunktion in Bearbeitung.

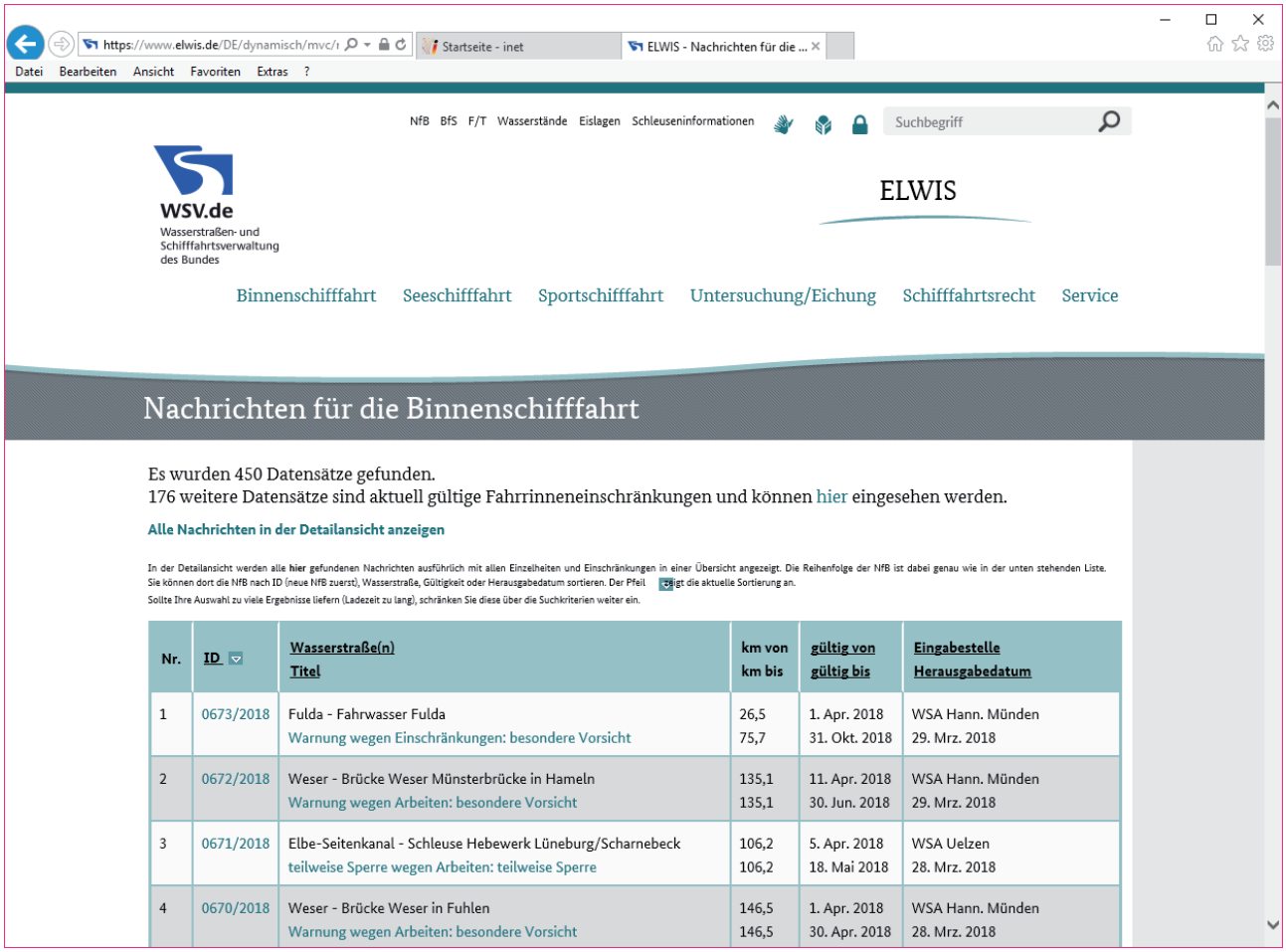


Abbildung 1: ELWIS – Beispiel einer Nachrichtenübersicht für die Binnenschifffahrt

2.4 Sicherheit der Navigation, verbessert durch AIS-AtoN-Nachrichten

AIS AtoN und Inland ECDIS sind geeignete technische Standards um die Sicherheit der Navigation zu verbessern. Umso mehr wenn diese Standards in kombinierten Anwendungen verwendet werden.

Einige konkrete Referenzanwendungen am Elbe-Weser-Korridor wurden im Rahmen des RIS-COMEX-Projekts gestartet. Sie werden installiert und im praktischen Einsatz erprobt. Beide Arten von AIS AtoN, das reell existierende „Real AIS AtoN“ und das virtuelle AIS AtoN, werden für spezifische AIS AtoN-Nachrichten verwendet werden.

Das Ziel ist es über die aktuelle Lage zu informieren und in der Inland ECDIS-Karte an Bord der Schiffe zu visualisieren.

Eine angegebene gefährliche Situation oder eine spezifische Empfehlung kann die Sicherheit der Navigation unterstützen. Im Elbe-Weser-Korridor planen wir folgendes zu realisieren:

- Empfohlene Fahrwege in spezifischen seichten Abschnitten mit häufigen Änderungen des Flussbetts, durch virtuelle Inland AIS AtoN-Liniennachrichten (siehe Abbildung 2) bereitgestellt
- Kennzeichnung eines virtuellen Hinweisgebiets das eine Fähre (insbesondere ein Kabelfähre) durchquert (gezeigt in Abbildung 3)
- Kennzeichnung einer derzeit beschränkten Durchfahrtshöhe unter Brücken (abhängig vom Wasserspiegel) (siehe Abbildung 4)
- Kennzeichnung des aktuellen Schaltzustands bei Signalen durch anwendungsspezifische Nachrichten (Abbildung 5 zeigt ein Beispiel)

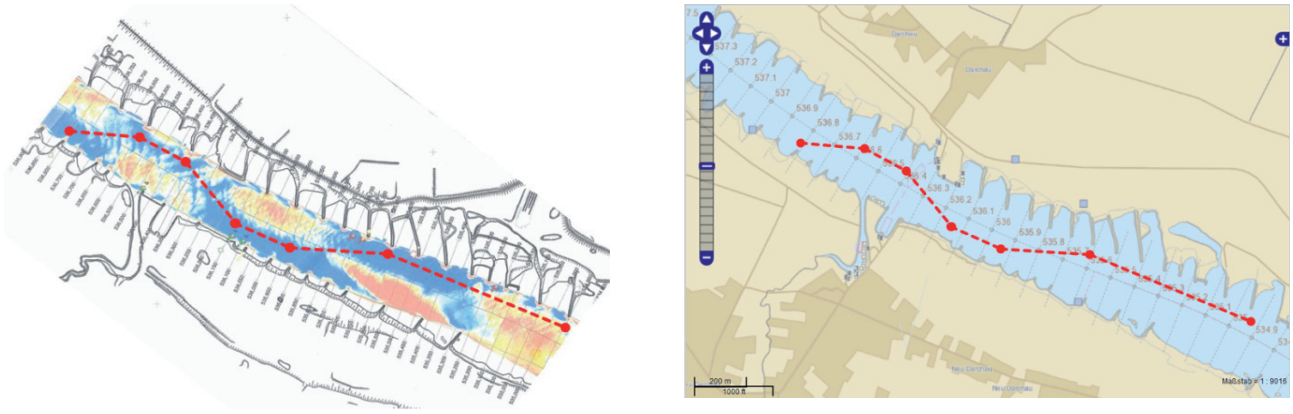


Abbildung 2: Erstellung eines empfohlenen Fahrwegs, visualisiert in Inland ECDIS

Abbildung 3: Kabelfähre an der Elbe, virtuelles Hinweisgebiet wo die Fähre kreuzt

Abbildung 4: Brücke an der Elbe, virtuelles Hinweisgebiet das eine niedrige Durchfahrtshöhe anzeigt

Abbildung 5: Aktueller Schaltzustand von Signalen, visualisiert in Inland ECDIS

Wir investieren ungefähr 900.000 Euro für:

- Erweiterung der bestehenden AIS-Landinfrastruktur und Realisierung der spezifischen AIS-AtoN-Nachrichten für die Übertragung (Übersichtskarte in **Abbildung 6**)
- Verbesserung der schon bestehenden Arbeitsumgebung für die Verwaltung, Bereitstellung und Überwachung von AIS-AtoNs im Korridor (Systemkomponenten der technischen Infrastruktur in **Abbildung 7**)
- Verbesserung von Inland-ECDIS-Systemen in Zusammenarbeit mit den Inland- ECDIS-Herstellern um AIS-AtoN-Nachrichten zu erhalten und sie auf dem System an Bord darzustellen
- Test der Effizienz und Wirksamkeit der bereitgestellten Informationen durch inkrementelle IENC-Updates an die Nutzer
- Zusätzliche Bereitstellung der AIS-AtoN-Informationen über einen Web Map-Dienst um Sportbootnutzer zu erreichen, die nicht gesetzlich verpflichtet sind, Inland ECDIS an Bord zu verwenden

Das Projekt wird von der EU mitfinanziert.

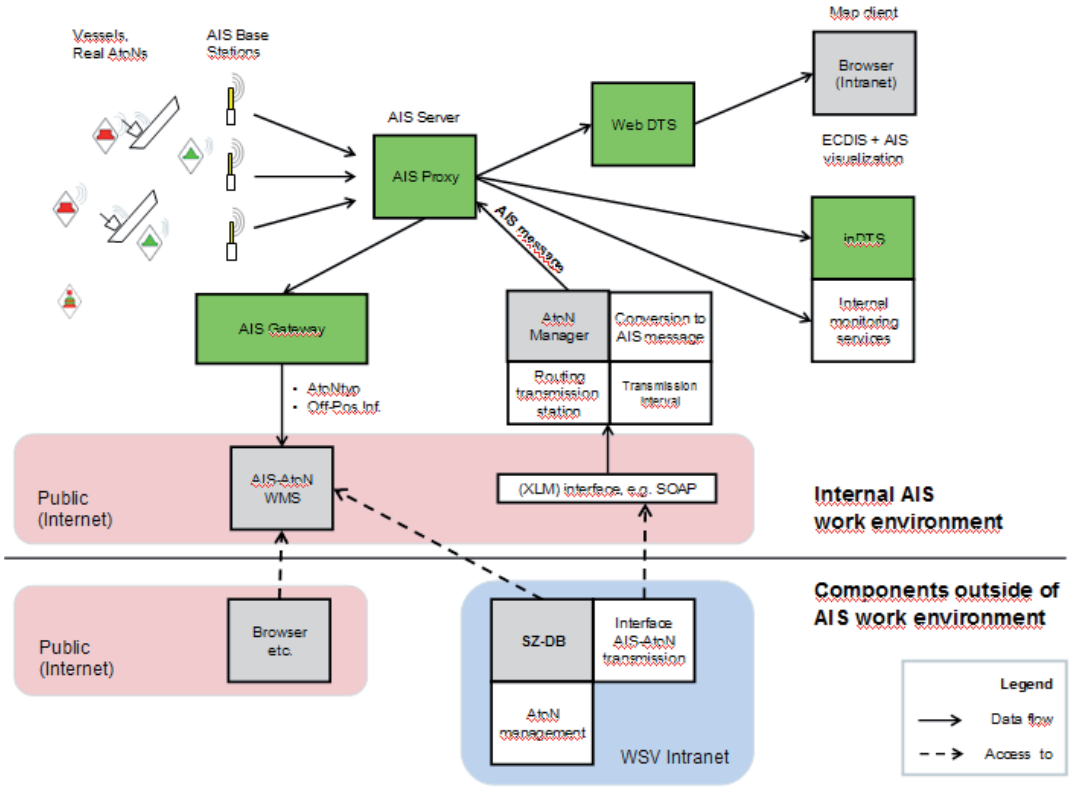


Abbildung 6: AIS-Datenverwaltung und AIS-Dienste

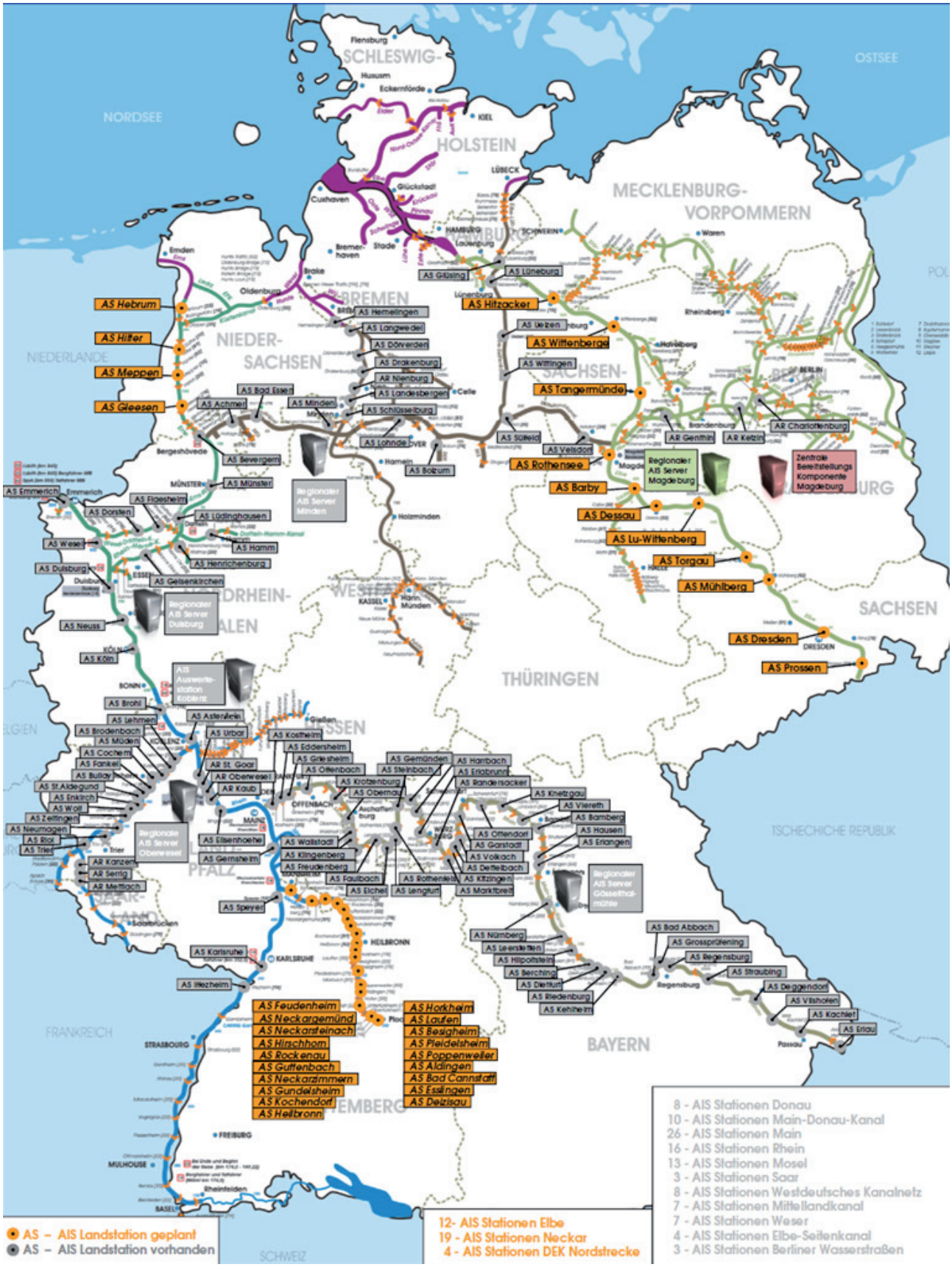


Abbildung 7: AIS-Landinfrastruktur in Deutschland

3. Aussichten für die nähere Zukunft und unsere Strategie

Momentan ist Projektarbeit im Gange einen Nachfolger für das heutige Berichts- und Informationssystem, bekannt als MIB und MIB II+, zu entwickeln.

Besonderes Augenmerk wird auf die effiziente Datennutzung gelegt werden müssen. Ein europäisches RIS-Konzept und ein RIS-Masterplan werden innerhalb des RIS-COMEX-Projekts entsprechend den konkreten Bedürfnissen der Wasserstraßenkorridorabschnitte entworfen und realisiert.

Neue wichtige Herausforderungen sind automatische Navigation und digitale Testfelder.

Heutzutage deckt automatische Navigation einen weiten Bereich von technischen Lösungen und Anwendungsfällen ab, die von einfacher Navigationsunterstützung bis hin zu vollautomatischer Navigation reichen.

Wie beim Transport auf See oder Straße zielen technische Entwicklungen auf die automatische Navigation in der Binnenschifffahrt ab. Internationale Binnenschifffahrtsprojekte wie LAESSI (Leit- und Assistenzsysteme zur Erhöhung der Sicherheit der Schifffahrt auf Inlandwasserstraßen) wollen den Schiffsführer bei seinen Aufgaben der Schiffsführung unterstützen und machen damit die Binnenschifffahrt sicherer und auch effizienter. Jenseits der Bewertung technischer Fähigkeiten und damit verbundener Vorteile/ Nachteile sollten durchführende Vorführer auch Erfahrung gewinnen können.

Daher steuern das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur und die Stadt Hamburg auf die gemeinsame Realisierung eines digitalen Testfelds im Hafen Hamburg zu.

Die Ziele sind:

- Verbesserung der Infrastruktur des Hamburger Hafen
- Optimale Nutzung der Verkehrsträger
- Erhöhte digitale Verbindung intermodaler Transportketten

Das existierende kleine Hafensystem (PORT) wird eine angemessene Grundlage für die Pilotanwendung bieten.

Weitere Initiativen auf den Binnenwasserstraßen sind geplant.

Im Gegensatz zu anderen Verkehrsträgern ist derzeit keine internationale Definition der Automatisierungslevel in der Binnenschifffahrt verfügbar. Erste Vorschläge sind durch die CCNR vorgestellt worden.

Quellenangaben

CCNR: Automatische Navigation. Vorgeschlagene Definition der Automatisierungslevel in der Binnenschifffahrt. 23.01.2018

CCNR: Elektronisches Kartendarstellungs- und Informationssystem, Ausgabe 1.02, 16.10.2003, Abschnitt 4

CCNR: Schiffsverfolgung und –identifikation in der Binnenschifffahrt, Ausgabe 1.0, 31.5.2006

Burchfield, R.W.(2004): Fowlers Moderner Englischgebrauch (Überarbeitete 3. Ausgabe). Oxford University Press. ISBN 978-0-19-861021-2.

Assistenzsysteme für die Binnenschifffahrt basierend auf Hochpräzisions-DGNSS (Forschungsprojekt LAESSI)

von
Dipl.-Ing. Rainer Strenge
Dipl.-Ing. Michael Hoppe
Dipl.-Ing. Martin Bröschel
Dipl.-Ing. Larisa Burmisova
Fachstelle der WSV für Verkehrstechniken, Koblenz

Dr.-Ing. Martin Sandler
in.innovative Navigation GmbH, Kornwestheim

Dr.-Ing. Anja Hesselbarth
Dr.-Ing. Ralf Ziebold
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Neustrelitz

Dipl.-Ing. Jürgen Alberding
Dipl.-Ing. Maik Uhlemann
Alberding GmbH, Wildau

Kurzfassung

Die Binnenschifffahrt ist ein wesentliches Element des deutschen Güterverkehrs, wobei der zunehmende Verkehr mit großen Schiffen auf engen Fahrwassern hohe Anforderungen an die verantwortlichen Schiffsführungen stellt. Das Projekt LAESSI (**L**eit- und **A**ssistenzsysteme zur **E**rhöhung der **S**icherheit der **S**chifffahrt auf **I**nland-Wasserstraßen) befasst sich mit der Entwicklung von Unterstützungsfunktionen für die Verbesserung der Navigation auf Binnenwasserstraßen. Hochgenaue Informationen zu Position und Kurs sind hierfür Voraussetzung. Ein Projektziel ist die Entwicklung eines Brückenanfahrwarnsystems zur rechtzeitigen Warnung der Schiffsführung, wenn die aktuelle Höhe von Steuerhaus, Radarmast oder sonstiger Aufbauten des Schiffes einer sicheren Brückenpassage entgegenstehen.

Eine Machbarkeitsstudie hat gezeigt, dass GNSS-Satellitennavigation (Global Navigation Satellite System) mit hochgenauen Positionsdaten als Grundlage für die zuverlässige Höhenbestimmung eines solchen Brückenanfahrwarnsystems dienen kann. Bei diesem Ansatz werden mindestens 300 Meter vor dem Passieren der Brücke exakte Informationen über die Durchfahrtshöhe des Bauwerks benötigt. Aufgrund der notwendigen vertikalen Genauigkeit von besser als 10 cm ist der Einsatz von Hochpräzisions-DGNSS erforderlich.

Es werden die Anforderungen an die Unterstützungsfunktionen, die Systemarchitektur und die hochgenaue Positionsbestimmung vorgestellt. Verwendet wird die in der Geodäsie etablierte RTK-Technologie (Real-Time Kinematic), jedoch ergänzt um landseitig generierte Korrektur- und Integritätsdaten. Die Übertragung an Bord erfolgt zusammen mit weiteren Wasserstraßeninformationen über die durch VDES (VHF Data Exchange System) bereitgestellten Frequenzbänder. VDES wird zurzeit als Nachfolgesystem für das etablierte AIS (Automatic Identification System, automatisches Schiffsidentifikationssystem) entwickelt. Eine Erprobung des Gesamtsystems erfolgte in Demonstrationsanwendungen an ausgewählten Flussabschnitten der Mosel und des Mains.

1. Einleitung

Obgleich die Binnenschifffahrt ein sehr sicheres Transportmittel ist, passieren Unfälle wie z. B. Kollisionen von Steuerhäusern mit Brückenbauteilen. Eine rechtzeitige Alarmierung bei zu hohen Aufbauten des Schiffes könnte helfen, diese Art von Kollisionen zu vermeiden. Zudem ist natürlich auch das alltägliche Führen z. B. eines 185 m langen Schubverbands in engen Fahrwassern eine anspruchsvolle Aufgabe, die die Entwicklung und den Einsatz von Assistenzsystemen begründet.

Ziel des LAESSI-Projekts ist es, die Schiffsführung bei ihrer Navigationsaufgabe zu unterstützen. Um dieses Ziel zu erreichen, nutzt LAESSI hochgenaue Satellitenpositionsdaten, landseitig generierte Korrektur- und Integritätsinformationen sowie neue Datenübertragungsverfahren.

Das Forschungsprojekt LAESSI setzt auf die Kernkompetenzen der beteiligten Institutionen und Firmen: in-innovative navigation GmbH, Alberding GmbH, DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) Institut für Kommunikation und Navigation und die Fachstelle für Verkehrstechniken der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV).

Im Folgenden werden zunächst die Anforderungen an die Unterstützungsfunktionen vorgestellt und ein Überblick über die Gesamtsystemarchitektur gegeben. Weiter wird das auf RTK-Technologie (Real-Time Kinematic) mit Integritätsdaten basierende hochgenaue Positionsermittlungssystem erläutert. Die Übertragung der Korrektur-/Integritätsdaten in Verbindung mit aktuellen Wasserstraßeninformationen erfolgt über die erweiterten Frequenzbänder des neuen VDES (VHF Data Exchange System), dem Nachfolgesystem zum eingeführten AIS. Abschließend werden die in Demonstrationsanwendungen an Mosel und Main erzielten Ergebnisse vorgestellt.

Das Projekt wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 03SX402 gefördert.

2. Das Konzept von LAESSI

2.1 Assistenzfunktionen

Folgende Assistenzfunktionen wurden im Rahmen von LAESSI entwickelt und erprobt:

- ein **Brückenanfahrwarnsystem** zur Alarmierung der Schiffsführung, falls Schiffskomponenten wie Steuerhaus oder Radarmast zu hoch für eine sichere Brückenpassage sind
- ein **Anlegeassistent** mit genauer Darstellung der Entfernung zu Kaimauern und anderen Schiffen
- eine **automatische Bahnführung** zur Entlastung bei der Routenführung, das Schiff folgt automatisch einem vorgegebenen Fahrweg
- ein **Conning-Displays** mit genauer Anzeige der Schiffsbewegung und Einbindung weiterer Informationen (Antriebsmaschine, Ruderlage etc.)

2.2 Systemanforderungen

Tabelle 1 zeigt die Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit und Integrität für die verschiedenen Assistenzfunktionen. Das Konzept der Brückenanfahrwarnung beruht auf den Vergleich der geodätischen Höhe der Schiffsaufbauten mit der geodätischen Höhe der Brückenöffnung bzw. der Durchfahrtshöhe. Daraus resultieren die Anforderungen hinsichtlich einer genauen Höhenmessung. Die Auswertung unterscheidet zwischen Fernbereich, ungefähr zehn Minuten vor der Brückenpassage, und einem Nahbereich im Zeitraum von etwa zwei Minuten vor Erreichen der Brücke. Eine Warnung unmittelbar vor der Passage erfordert natürlich sofortige Maßnahmen der Schiffsführung. Daraus resultieren hohe Integritätsanforderungen in diesem Zeitintervall und eine kurze Alarmierungszeit. Für die Bewegungsprädiktion des Schiffs unmittelbar vor der Brückenpassage werden hochgenaue Positions- und Kursinformationen verarbeitet.

Auch der Anlegeassistent stellt hohe Anforderungen an die Genauigkeit von Position und Kurs. So soll jeder Punkt eines 185 m-Schubverbands mit einer Genauigkeit von besser als 10 cm bekannt sein. Das Integritätsrisiko beruht auf einem nichterkannten Fehler während drei Jahre Normalbetrieb. Die Vorgabe von 6 s von der Detektion bis zur Alarmanzeige berücksichtigt die langsame Geschwindigkeit des Schiffs in dieser kritischen Manöversituation.

Die Integritätsanforderungen für die Conning-Anzeige sind ähnlich definiert. Auch in engen Gewässern liegen die Abstände eines Schiffs zu Kaimauern oder anderen Schiffen meistens nicht im cm-Bereich. Daher sind die Genauigkeitsanforderungen für diese Funktion niedriger. Für die automatische Bahnführung des Schiffs ist keine außerordentlich hohe Genauigkeit erforderlich. Im Gegensatz zu anderen Assistenzfunktionen ist der Schiffsführer hier nicht Teil der Kontroll- und Handlungsschleife.

	Brückenanfahrwarnung	**Automatische Bahnführung**	**Anlegeassistent**	**Conning-Anzeige**
Positionsgenauigkeit [cm]	20	30	10	20
Höhengenauigkeit [cm]	10	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant
Kursgenauigkeit [°]	0,3	0,17	0,07	0,1
Integritätsrisiko	$10*10^{-5}$ / 2 min $30*10^{-5}$ / 8 min	$0,55*10^{-5}$ / 3 h	$18*10^{-5}$ / 10 min	$18*10^{-5}$ / 1 h
Zeitspanne bis zum Alarm [s]	4 6	2	6	6

Tabelle 1: Anforderungen an die Assistenzfunktionen hinsichtlich Genauigkeit und Integrität

Die Aufgaben betreffen die Überwachung des Systems sowie die strategische Planung des Fahrweges. Sprünge aufgrund von Fehlern in der Positionsmessung können sofortige Auswirkungen auf die Steuerkommandos haben. Daher muss die Funktion sehr zuverlässig arbeiten. Das definierte Integritätsrisiko erlaubt einen nichterkannten Fehler bei 100 Fahrten pro Jahr.

2.3 Gesamtsystemarchitektur

Die erforderliche Genauigkeit im Dezimeter- und Zentimeterbereich kann durch die derzeit verwendeten codebasierten Positionsbestimmungsmethoden mit üblichen Positionsempfängern für Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) nicht erreicht werden. LAESSI setzt die für geodätische Anwen-

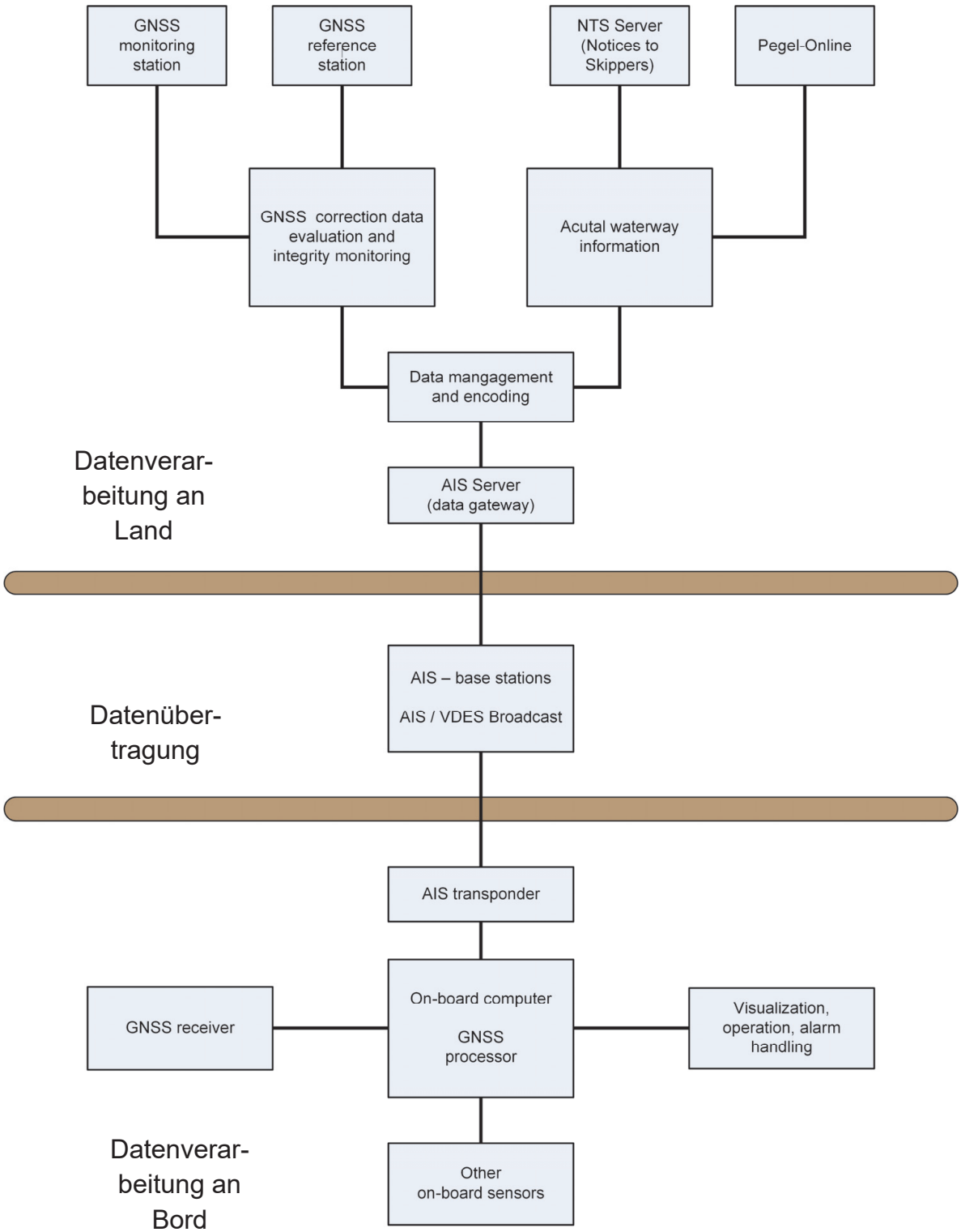


Abbildung 1: Gesamtsystemarchitektur

dungen übliche phasenbasierte Positionsbestimmung (RTK) ein. Neben einer genauen Position sind exakte Daten aus den Binnenwasserstraßenkarten (Inland-ECDIS) und aktuelle Wasserstraßeninformationen erforderlich.

Abb. 1 zeigt die Architektur des LAESSI-Systems. Die landseitige Datenverarbeitung stellt GNSS-Korrekturdaten für die RTK-Verarbeitung an Bord zur Verfügung. Vor der Übermittlung der Korrekturdaten zu der weiteren Prozessebene erfolgt eine Integritätsprüfung. Diese ist sozusagen der erste Schritt des Integritätskontrollrahmens. Darüber hinaus werden aktuelle Informationen zu den Wasserstraßen bereitgestellt.

Die Übermittlung dieser Daten von Land an die Schiffe erfolgt über VDES (VHF Data Exchange System), VDES ist das Nachfolgesystem zum eigeführten AIS. Ein GNSS-Empfänger, der die an Land generierte Korrektur- und Integritätsdaten verarbeitet, erzeugt die hochgenauen GNSS-Lösungen. Prozessoren auf dem Schiff überwachen ebenfalls die Integrität und führen die Assistenzfunktionen aus. An Bord werden zudem weitere Bordsensoren wie Inertialmesssysteme, Drehgeschwindigkeitsanzeiger, Lasercanner zur Entfernungsmessung etc. in die Verarbeitung einbezogen.

3. Datenverarbeitung und -übertragung

3.1 Landseitige Datenverarbeitung

Die Assistenzfunktionen an Bord erfordern sowohl präzise Positionsdaten als auch relevante Wasserstraßeninformationen. Diese Informationen werden durch den entsprechenden Dienst an Land generiert und an das Schiff übertragen. Eine Übersicht über die landgestützten Dienste zeigt Abb. 2.

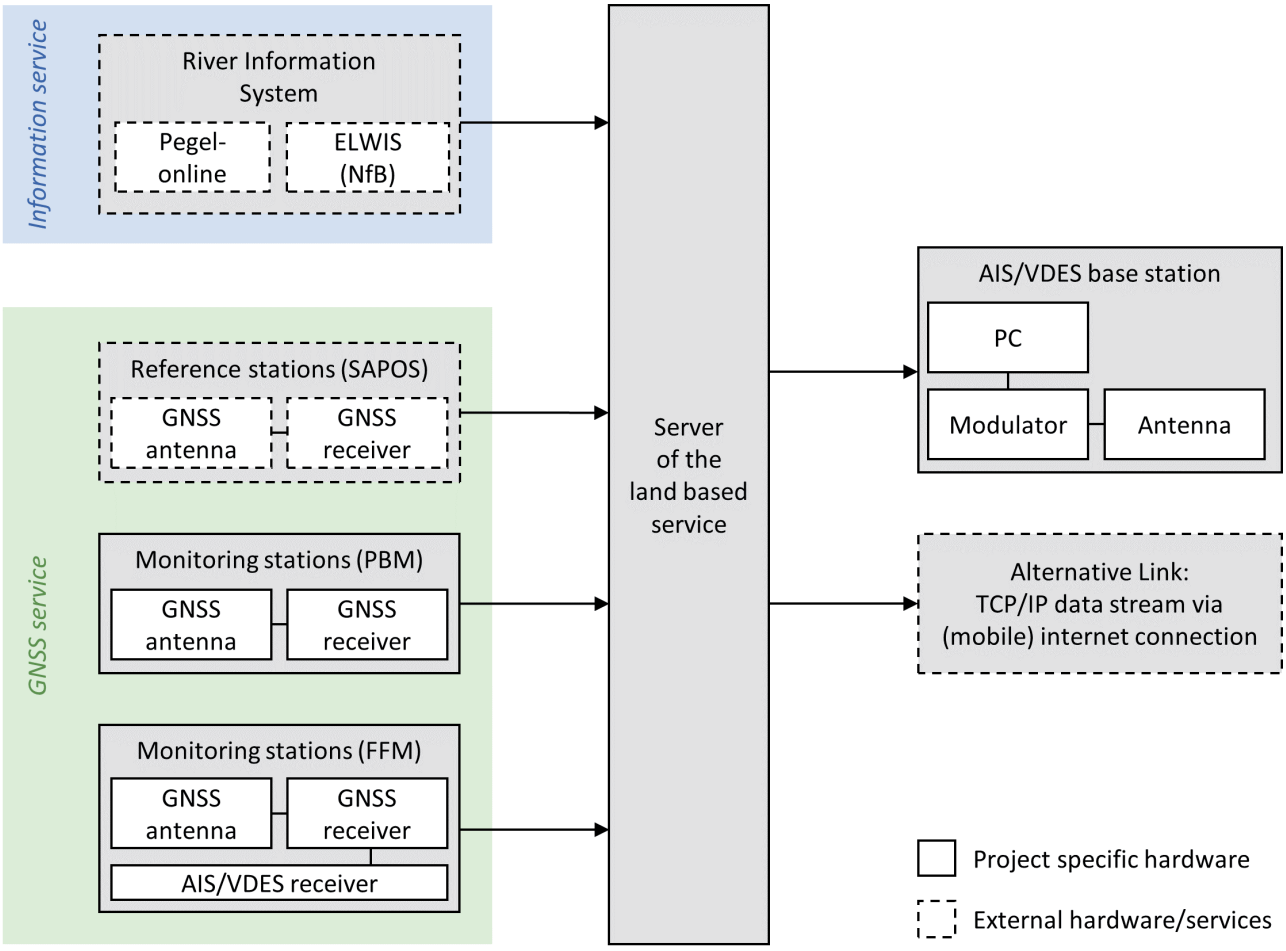


Abbildung 2: landseitige Dienste

Für Geodäsie-Anwendungen wird Real-Time-Kinematic-Technik (RTK, Echtzeitkinematik) eingesetzt, mit der eine Position basierend auf Trägerphasen-GNSS-Messungen und entsprechenden Korrekturdaten zentimetergenau bestimmt werden kann. Die Ermittlung von RTK-Korrekturdaten erfordert ein Netzwerk permanenter GNSS-Referenzstationen mit geeigneter räumlicher Verteilung. LAESSI nutzt hierfür den Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS). Die Daten sind in einem standardisierten Format für den zentralen Verarbeitungsserver verfügbar. Ein komplexer Algorithmus für die RTK-Verarbeitung im Netzwerk bestimmt die GNSS-Korrekturdaten für die Umgebung der aktuellen Schiffsposition. Eine Integritätsprüfung erfolgt bevor die Korrekturdaten über einen standardisierten Kommunikationskanal (Pre-Broadcast Monitoring) an Bord übertragen werden. Das Ergebnis dieser Integritätsprüfung wird auch zur Qualitätsbewertung an Bord angezeigt. Zusätzlich wird eine Verifizierung der berechneten Korrekturen an landseitigen Fernfeld-Überwachungsstationen durchgeführt. Diese liefern weiter Performance-Indikatoren für die Qualitätsüberwachung. Die Anforderungen an den landseitigen GNSS-Korrekturdienst ergeben sich aus den Anforderungen an die Assistenzfunktionen:

- Die Genauigkeit der berechneten GNSS-Position an Bord soll in horizontaler und vertikaler Richtung geringer als 10 cm betragen.

- Der Dienst soll fehlerhafte Satelliten-Ephemeriden-, Uhr- oder Korrekturdaten innerhalb einer definierten Zeitspanne erkennen und als Integritätsinformation an das Schiff übertragen.

- Die Verfügbarkeit des Dienstes soll der Definition der IMO-Normen folgen (IMO-Entschl. A.953 (23)). Zudem muss der Dienst sicherstellen, dass die Integritätsdaten, die an und über das verwendete Kommunikationssystem übertragen werden, fehlerfrei sind (Prüfsummen-Verfahren).

- Die übertragenen GNSS-Korrekturdaten sollen sich auf die neueste Version des ETRS89-Koordinatenreferenzsystems beziehen, das auch von offiziellen deutschen Vermessungs- und Kartierungsbehörden verwendet wird. Dadurch kann eine homogene Datenbasis erstellt und die Vergleichbarkeit mit externen Vermessungsdaten wie Brückenprofilen und Hafenkarten sichergestellt werden.

Neben genauen Positionsdaten sind für die Schiffsführung auch aktuelle Hinweise zu den Wasserstraßen von Interesse, zum Beispiel gesperrte Abschnitte, Durchfahrtshöhenbeschränkungen durch Bauarbeiten an einer Brücke und Informationen zum Wasserstand. In Deutschland werden diese Informationen über die Internetportale ELWIS und PEGELONLINE veröffentlicht. Die benötigten Informationen werden von den genannten Webdiensten abgerufen, auf Plausibilität geprüft und per AIS/VDES als Nachricht, Application Specific Messages (ASM), an das Schiff übertragen. Die Übertragung erfolgt regionalspezifisch, d.h., nur für die jeweilige Fahrt relevante Informationen werden übertragen.

3.2 Datenübertragung

Wie oben beschrieben werden phasenbasierte GNSS-Korrekturen zusammen mit Integritätsinformationen an die Bordeinheit übertragen. Diese Daten basieren auf Trägerphasenmessungen für die satellitengestützten Navigationssysteme GPS und GLONASS. Die Übertragungsrate liegt etwa im Bereich von 7 KBit/s mit einer Aktualisierung innerhalb von 1-2 Sekunden. Zusätzlich zu den GNSS-Korrekturen werden Informationen über Wasserstände und relevante Nachrichten für die Binnenschifffahrt (NfB) übertragen.

Daraus ergeben sich die folgenden Anforderungen an die Datenübertragung:

- Datenübertragungsrate: > 9,6 KBit/s, dadurch Aktualisierungsrate von < 2 s möglich

- Abdeckung: vollständige Abdeckung (teilweise überlappend) entlang der Binnenwasserstraßen

- Standardisierung: Datenübertragung nach einem international standardisierten Kommunikationsverfahren

Das AIS (Automatic Identification System, automatisches Schiffsidentifikationssystem) ist in der See- und Binnenschifffahrt bereits für den Austausch von Navigationsdaten zwischen Schiffen, zwischen Schiff und Land und zwischen Land und Schiff standardisiert und eingeführt. Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes betreibt ein landseitiges AIS-Netzwerk an den Küstengewässers und den Binnenwasserstraßen. In Verbindung mit einer Ausrüstungspflicht ist AIS im Grunde ein geeignetes Mittel für die Übertragung von Korrekturdaten und Wasserstraßeninfor-mationen. Jedoch ist die Datenkapazität des bestehenden AIS begrenzt. Insbesondere die erforderliche hohe Aktualisierungsrate würde eine große AIS-Datenlast verursachen und die Funktion des AIS-Dienstes beeinträchtigen. Derzeit werden codebasierte GPS-Korrekturdaten mittels der standardisierten AIS-Message 17 übermittelt. Dieser Nachrichtentyp ist jedoch nicht für RTK-Meldungen spezifiziert. Im

Rahmen des LAESSI-Projekts ist das sich zurzeit in der Entwicklung befindende Nachfolgesystem von AIS, das sogenannte VDES (VHF Data Exchange System, VHF-Datenaustauschsystem) für die Datenübertragung von Land zum Schiff vorgesehen. VDES bietet zusätzliche terrestrische Übertragungskanäle innerhalb eines definierten Frequenzbands und ermöglicht daher eine höhere Datenübertragungskapazität.

Eine mögliche Alternative wäre die Nutzung von GSM-Mobilfunk zur Datenübertragung. GSM bietet allerdings keine vollständige Abdeckung der Binnenwasserstraßen und steht unter bestimmten Umständen, zum Beispiel bei einer großen Anzahl von Nutzern, nicht oder nur eingeschränkt zur Verfügung. Dieser Dienst bietet daher nicht geforderte Verfügbarkeit. GSM dient jedoch im Rahmen von LAESSI als Rückfallebene in den Bereichen ohne AIS-Landinfrastruktur.

Die Tests der Fahrassistenzanwendungen sind in ausgewählten Flussabschnitten von Mosel und Main durchgeführt worden. Die vorhandene AIS-Infrastruktur wurde hierfür mit modifizierten Basisstationen zur Simulation des künftigen VDES ergänzt. Dieses Systemkonzept ermöglichte die Verwendung von AIS-Standardausrüstung an Land und auch an Bord mit Nutzung der zukünftig bei VDES vorgesehen Frequenzen. Auf diese Weise ließen sich nachteilige Auswirkungen auf das operationelle AIS-System im Testzeitraum vermeiden. Die Verwendung von umgerüsteter Standard-AIS-Technik bedeutete jedoch auch eine Reduzierung der Datenübertragungsrate auf 9,6 KBit/s.

4. Überwachung der Integrität an Bord

4.1 Trägerphasenverarbeitung

Üblicherweise werden für die Navigation auf Binnenwasserstraßen in den Empfängern codebasierte Techniken wie das IALA Beacon DGNSS (Differential-GPS) mit Genauigkeiten von wenigen Metern verwendet. Die Anforderungen für die beschriebenen Assistenzfunktionen sind jedoch deutlich höher. Mit dem Prinzip der Trägerphasenmessungen sind Zentimetergenauigkeiten erreichbar. Die Herausforderung bei der Nutzung von Trägerphasenmessungen liegt darin, die unbekannte Anzahl an Wellenphasenzyklen, Ambiguitäten bzw. Mehrdeutigkeiten, zu lösen. Können Ambi¬guitäten als Float-Werte geschätzt werden, ist eine dezimeterge¬naue Festlegung der Position möglich. Mit ganzzahligen Trägerphasenambiguitäten kann eine cm-Genauigkeit erreicht werden. Verschiedene Einflüsse wie Signalunterbrechungen,

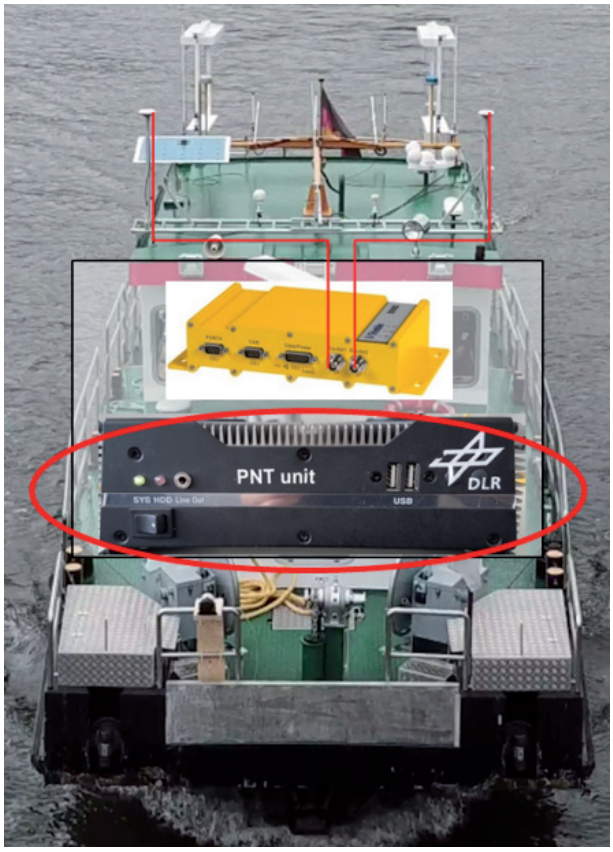


Abbildung 3: PNT-Bordeinheit

Mehrwegausbreitungen (Multipath), Cycle Slips und Messrauschen beeinträchtigen die Ambiguitätenauflösung und damit auch die Genauigkeit der Positions- und Geschwindigkeitsermittlung. Diese speziellen stationsabhängigen Effekte lassen sich nicht durch landbasierte Korrekturdaten verringern. Zusätzlich beeinflussen atmosphärische Effekte die Positionsbestimmung. Die Positionsfehler sind hierbei abhängig von der Entfernung zwischen der landseitigen Referenzstation und dem Bordempfänger. Für hochgenaue (weniger als 10 cm in horizontaler und vertikaler Richtung) Positionsergebnisse und zuverlässige PNT-Daten (Position, Navigation, Timing) zu erhalten, ist eine enge Kopplung der GNSS-Messungen (Phase und Code) mit anderen Sensoren wie Inertialmesssystem, Drehgeschwindigkeitsanzeige etc. sowie eine komplexe Verarbeitung mit einem Extended Kalman Filter (EKF) erforderlich. Diese Kombination hat den Vorteil, dass kurze GNSS-Signalausfälle (Abschattungen durch Brücken oder Gebäude) überbrückt werden können. Darüber hinaus ermöglichen weitere Sensordaten und die Kombination aller Sensoren das Erzeugen von Integritätsinformationen mit noch höherer Qualität. Die beschriebenen Funktionen sind in der vom DLR entwickelten PNT-Bordeinheit (Abb. 3) integriert.

4.2 3-Phasen-Integritätskonzept

Abb. 4 zeigt das bordseitige Integritätskonzept. Zuerst werden die Parameter der EKF-basierten RTK-Verarbeitung verarbeitet. Dazu gehört eine Validierung der aufgelösten Ambiguitäten und Abweichungen von den Anpassungsalgorithmen. Im nächsten Schritt erfolgt ein Vergleich mit den Ausgabedaten der verschiedenen Sensoren wie Länge der Antennenbasislinie, Geschwindigkeit, Kurs und Höhendifferenz. Zudem werden die landseitig ermittelten Integritätsinformationen für eine Validierung der Positionsgenauigkeit verarbeitet. Für alle individuellen Parameter sind basierend auf den Anforderungen der Assistenzfunktionen Schwellenwerte vorgegeben. Nur wenn die Parameter unter den definierten Schwellenwerten liegen, wird die Integrität insgesamt positiv bewertet und die PNT-Daten gelten somit als zuverlässig.

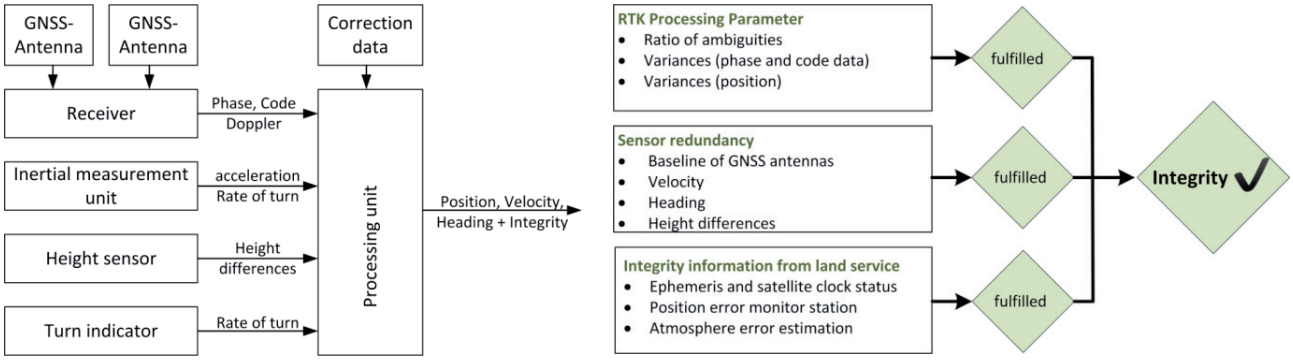


Abbildung 4: Verarbeitung an Bord mit RTK-Algorithmus und zusätzlichen Sensoren (links), 3-Phasen-Integritätskonzept (rechts)

5. Durchgeführte Tests und Ergebnisse

Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, hat das LAESSI-Projekt vier Entwicklungs-schwerpunkte:

- neue Fahrassistenzfunktionen,
- PNT-Bordeinheit mit der erforderlichen Genauigkeit und Integrität für 3D-Positions-bestimmung und Kurs,
- Soft- und Hardware für die Bereitstellung von integritätsüberwachten GNSS-Korrekturen (RTK) und Wasserstraßeninformationen und
- Nutzung eines Kommunikationskanals für die Übermittlung von GNSS-Korrekturen und Wasserstraßeninformationen mit hoher Datenübertragungsrate über modifizierte AIS-Basisstationen zur Simulation des neuen VDES-Konzepts.

Für das Testen und Validieren des Systemkonzepts wurden zwei Testfelder eingerichtet. Das Testfeld Koblenz mit drei Brücken und dadurch bedingten Signalabschattungen an der Mosel diente ersten Tests der Systemkomponenten. Ein zweites Testfeld am Main diente der Systemintegration und Untersuchungen auf einem längeren Wasserstraßenabschnitt. Für Tests während einer regulären Fahrt stand mit MS „El Niño“ ein 180 m langes kommerziell fahrendes Binnenschiff zur Verfügung. Das Schiff verkehrt regelmäßig zwischen Rotterdam (Niederlande) und Linz (Österreich).

5.1 Tests

Erste Tests zur Leistungsfähigkeit der verschiedenen Sensoren, zur Datenübertragung und Kommunikation wurden auf dem Koblenzer Testfeld durchgeführt. Die verschiedenen Systemkomponenten zeigten bei der Auswertung die erwartete Leistung. In einem zweiten Schritt wurde im Testfeld Main mit einer größeren Messkampagne im Oktober 2017 die vollständige Systemintegration erreicht. Das neue Kommunikationssystem auf Grundlage der umgerüsteten AIS-Basisstationen konnte hierbei intensiv getestet werden. Die Ergebnisse werden in den folgenden Unterabschnitten erläutert. Während dieser Testkampagne wurden viele weitere Aspekte analysiert. Diese werden noch in separaten Abhandlungen veröffentlicht.

5.2 Datenkommunikation

Neben zahlreichen weiteren Messungen zur erzielbaren Positions- und Lagegenauigkeit ermöglichte die Testkampagne das Überprüfen der modifizierten AIS-Übermittlungen auf benachbarten Frequenzkanälen gemäß dem sich in der Entwicklung befindenden VDES-Standard. Im Testfeld Main wurden fünf AIS-Landstationen mit dieser zusätzlichen Funktionalität ausgestattet, Abb. 5. Diese Konfiguration er-

möglichte Test zur Verfügbarkeit von umgerüsteten AIS-Basisstationen mit überlappenden Sendebereichen entlang eines etwa 100 km langen Flussabschnitts.

Abb. 6 zeigt eine Messung der Signalausbreitung im Testbereich und belegt die gute Überlappung von AIS bzw. des simulierten VDES-Systems. Zwischen Erlabrunn (Main, km 240) und Steinbach (Main, km 200) wurden zwei AIS-Basisstationen bewusst nicht installiert, um den Übergang auf GSM-Kommunikation zu testen und die grundsätzliche Eignung dieser Rückfallebene zu bewerten.

Eine erste Analyse zeigte die Schwierigkeit, eine ausreichende Datenkapazität für eine RTK-Fix-Lösung zu erreichen. Eine RTK-Fix-Lösung war im überwiegenden Teil des Testfelds, ausge¬nommen der nordöstliche Bereich ohne AIS-Ausstattung, möglich, Abb. 7. Dessen ungeachtet war jedoch das Datenalter in einigen Bereichen des Testfelds Main aufgrund der eingeschränkten Datenkapazität des AIS-Kanals zu hoch. Dieses liegt an der Übertragung auf nur einem der beiden verfügbaren AIS-Kanäle (Kanal A) für den Testzeitraum. Mit Nutzung beider Kanäle (A und B) ließe sich ein besseres Ergebnis erwarten.

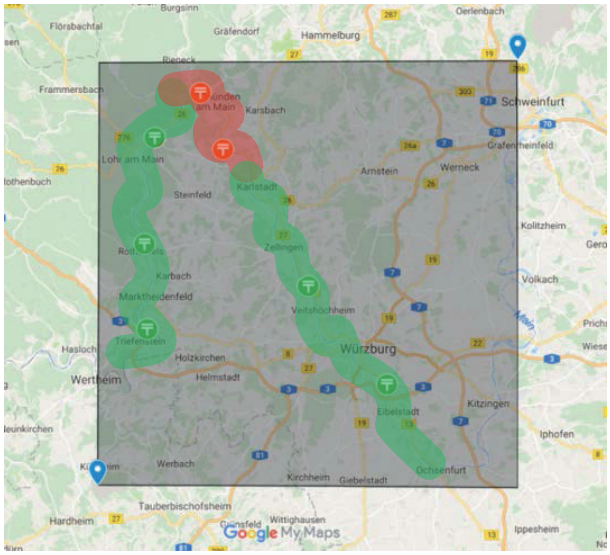


Abbildung 5: Testfeld Main mit zusätzlichen AIS-Basisstationen an Land zur Übermittlung auf neuen VDES-Frequenzkanälen (grün) und Bereich für GSM-Verbindung (rot); dunkelgrau, regionaler Bereich für Frequenzkanäle 2025 und 2026

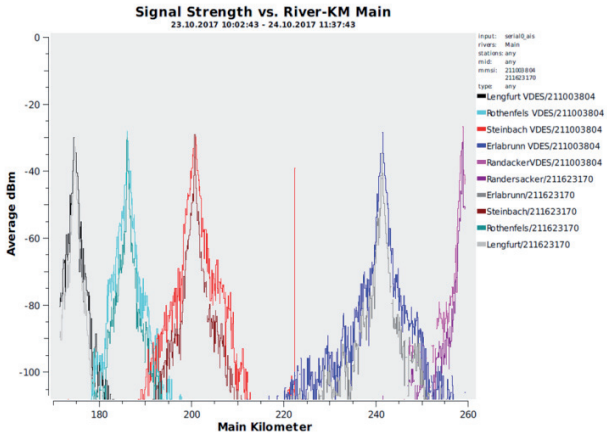


Abbildung 6: Messungen der Abdeckung für AIS- und VDES-Frequenzen entlang des Mains, 10/2017

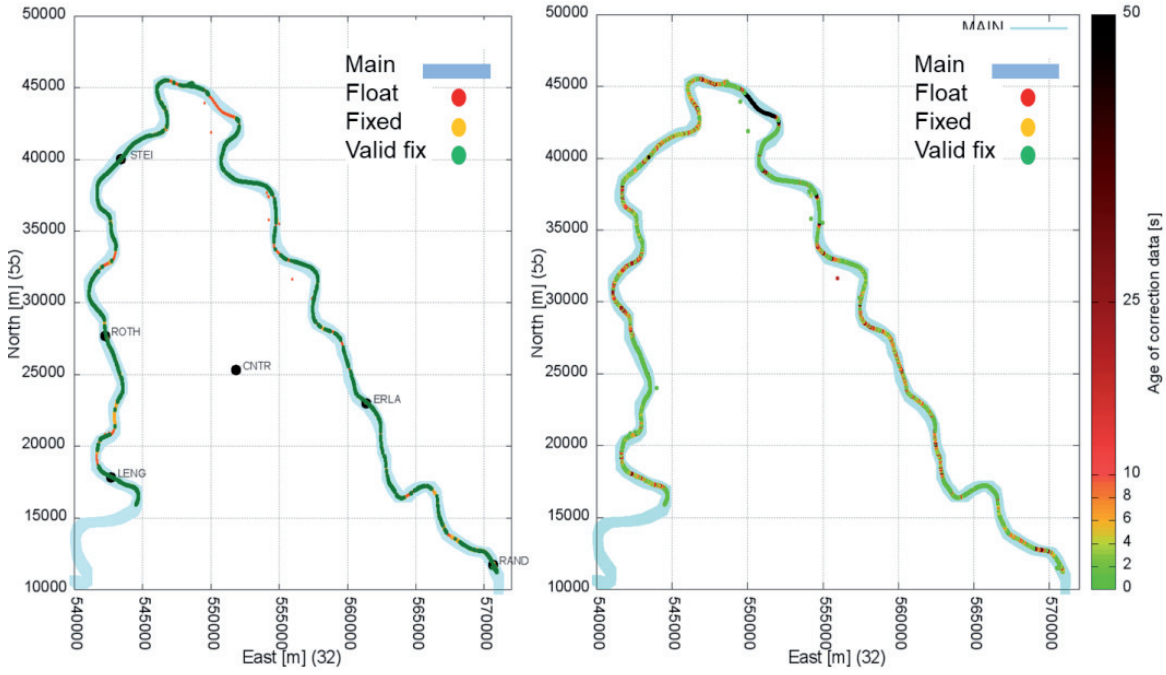


Abbildung 7: Datenanalyse (Fix-Lösung und Datenalter) für AIS und GSM am Main-Testfeld, 10/2017

Abb. 8 bietet eine Übersicht über die Verfügbarkeit der getesteten Kommunikationsoptionen entlang des Testfelds. Wie erwartet liegt die Verfügbarkeit der modifizierten AIS-Übertragungen wegen der Beschränkung auf einen AIS-Kanal und der dadurch reduzierten Übertragungskapazität lediglich bei etwa 80% im Vergleich zu GSM oder dem zukünftigen VDES. Im Weiteren zeigen die Testergebnisse den Bedarf an neuen Methoden zur Datenkomprimierung und -kodierung vor der Aussendung. Voraussetzung ist der Einsatz echter VDES-Technologie mit deutlich höherer Datenübertragungsrate.

		Valid KD	Float	Fixed	Fixed+ (4 s)	Fixed+ (2 s)
296 Tag	Via GSM	92,5	14,1	83,8	79,7	79,3
	Via AIS	77,7	28,2	71,6	60,3	53,5
296 Nacht	Via GSM	100,0	3,7	96,3	95,9	95,9
	Via AIS	99,8	2.2	97,8	96,8	96,5
297 Nacht	Via GSM	100,0	0,1	99,9	99,8	99,8
	Via AIS	100,0	1,9	98,1	97,0	97,0
297 Tag	Via GSM	92,9	10,8	86,5	82,3	81,9
	Via AIS	70,1	22,5	77,4	55,3	46,2

Abbildung 8: Verfügbarkeitsanalyse verschiedener RTK-Fix für modifizierte AIS- und GSM-Übertragung, 10/2017

5.3 Weitere Ergebnisse

Das Projekt LAESSI zielt auf das Entwickeln und Testen erster Assistenzfunktionen mit Brückenanfahrwarnung, automatische Bahnführung, Anlegen und Conning. Diese Funktionen konnten erfolgreich durch die Fa. innovative navigation GmbH implementiert und getestet werden. Abb. 9 zeigt die realisierten Anzeigen für die Brückenanfahrwarnung und den Anlegeassistenten. Die anzeigten Abstandswerte basieren auf Entfernungsberechnungen zu Inland-ECDIS-Konturen von Kaimauern etc. Zusätzlich erfolgt eine Visualisierung der mit Laserscannern ermittelten Abstände und Konturen.

Abb. 10 zeigt die im Radarbild integrierten Bahnführungslinien sowie das Darstellungskonzept mit zwei Monitoren für die Bereitstellung der Assistenzinformationen. Für die Bereitstellung zuverlässiger und integritätsgeprüfter Positions-, Navigations- und Zeitdaten zur Nutzung durch die neuen Assistenzfunktionen konnte das DLR den Prototyp einer PNT-Bordeinheit implementieren und testen. Alberding GmbH entwickelte und testete neue landbasierte Dienste. Hierzu wurden verschiedene Softwaremodule zur Bereitstellung der RTK-Korrekturdaten und Wasserstraßeninformationen für die AIS-Basisstationen entwickelt. Die WSV war für die Bereitstellung der Kommunikationsinfrastruktur in den Testgebie-

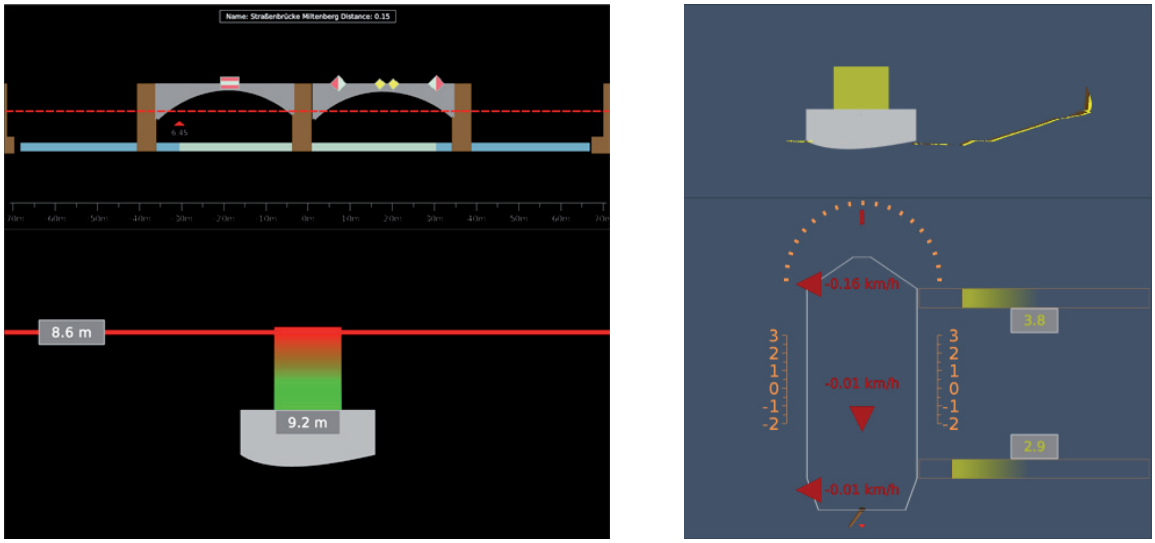


Abbildung 9: Beispiele von Anzeigen (linkes Bild: Warnin-formationen zur Brückenhöhe; rechtes Bild: Anlegeassistent mit Laserscanner-Ergebnissen und Entfernungen zum Anleger

ten verant-

wortlich. Im Rahmen des Projekts konnte hierfür erstmalig eine VDES-Simulation mittels modifizierter AIS-Basisstationen mit Übertragung auf zusätzlichen Frequenzkanälen realisiert werden. Die Übertragung erfolgt auf Frequenzkanälen mit geringem Frequenzabstand zum Standard-AIS. Dadurch sind zusätzliche Maßnahmen für eine störungsfreie Übertragung mit hoher Datenrate erforderlich, um beide Verfahren am gleichen Standort zu ermöglichen. Ziel ist es natürlich, die vorhandene Infrastruktur (Kommunikationsanbindung, Antennenträger, etc.) der WSV zu nutzen. Dadurch waren zusätzliche Maßnahmen für eine störungsfreie Übertragung mit hoher Datenrate erforderlich, um beide Verfahren am gleichen Standort zu ermöglichen.

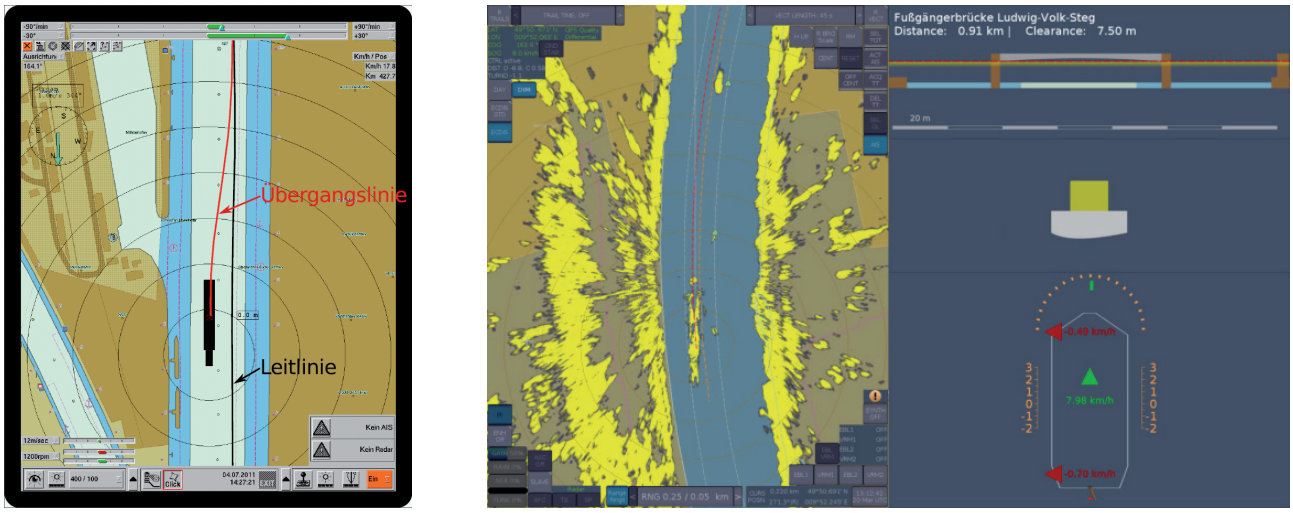


Abbildung 10: automatische Bahnführung (linkes Bild), Ref. ISR, Universität Stuttgart Displaykonzept (rechtes Bild)

6. Fazit und Ausblick

Das LAESSI-Projekt ist ein erster Schritt in der Anwendung von Assistenzsystemen für die Binnenschifffahrt. Die positiven Rückmeldungen der am Projekt beteiligten Schiffsführer zu den Funktionen und Darstellung der Assistenzdaten auf den Borddisplays bestätigen, dass LAESSI zur weiteren Verbesserung der Sicherheit auf Binnenschifffahrtsstraßen beitragen wird. Die erzielten Erkenntnisse und Basisentwicklungen unterstützen darüber hinaus die bereits begonnene Entwicklung autonom fahrender Binnenschiffe.

Eine Weiterentwicklung der Systemtechnologie für neue Bordanwendungen ist beabsichtigt. Ein Ziel ist hierbei die automatische Einfahrt in eine Schleuse. Voraussetzung ist hierfür die realzeitliche Bereitstellung noch präzisere GNSS-Korrekturdaten (z. B. durch die Anwendung neuer Verfahren wie PPP (Precise Point Positioning). Der Start eines Nachfolgeprojekts ist für Mitte 2018 geplant.

Referenzen

Bober S (2015). AIS next generation – the development of the VHF Data Exchange System (VDES) for maritime and inland navigation, PIANC SMART Rivers 2015, Buenos Aires

Sandler M, Heßelbarth A, Ziebold R, Alberding J, Uhlemann M, Hoppe M, Bröschel M (2016). Setting up driver assistance functions for inland vessels based on high precision and integrity checked positioning information, MTE-ISIS Conference, Hamburg.

Sandler M, Heßelbarth A, Alberding J, Hoppe M (2018), LAESSI – finale Projektpräsentation (noch nicht veröffentlicht), Würzburg

Strenge, R (2015). AIS land infrastructure on German Inland Waterways, PIANC SMART Rivers 2015, Buenos Aires

Funknavigationsanwendungen in der Schifffahrt (Maritim und Binnenbereich)

Dipl.-Ing. (FH) Michael Hoppe
Fachstelle der WSV für Verkehrstechniken, Koblenz
Dipl.-Ing. Rainer Strenge
Fachstelle der WSV für Verkehrstechniken, Koblenz

Kurzfassung

Die zuverlässige Bestimmung von Positions-, Navigations- und Zeitdaten (PNT) ist eine wesentliche Voraussetzung für die Sicherheit und Effizienz des Schiffsverkehrs, sowohl im maritimen Bereich als auch auf Binnenwasserstraßen. GNSS (und hier insbesondere GPS) ist zur wichtigsten Positionsdatenquelle für die See- und Binnenschifffahrt geworden. Die GNSS-Position wird sowohl für die Schiffsnavigation als auch als Grundlage von AIS-Positionsmeldungen verwendet. Die IMO (International Maritime Organisation) hat die zuverlässige und robuste Bereitstellung von PNT-Daten als eine Kernaufgabe im Zusammenhang mit ihrer e-Navigation Strategie identifiziert. Weiterhin wurde anerkannt, dass eine Reihe von technisch unterschiedlichen Systemen erforderlich sind, um die Zuverlässigkeit von PNT-Daten zu gewährleisten. Der kombinierte Einsatz von PVT-relevanten Sensoren (z.B. GNSS-Empfänger, DGNSS-Korrekturen, Multi-Radionavigationsempfänger) und weiterer Schiffssensorik (z.B. Gyro, RADAR etc.) schafft die notwendige Redundanz, um die Daten- und Systemintegrität zu gewährleisten und die Leistungsfähigkeit der bereitgestellten PNT-Daten zu verbessern.
Wegen der Anfälligkeit von GNSS für absichtliche (Jamming und Spoofing) oder unabsichtliche Störungen (z.B. extreme Sonnenaktivitäten) kann es zum Verlust der Positionsinformation oder auch zu falschen Positionsberechnungen kommen. Daher werden international derzeit weitere Möglichkeiten zur Bereitstellung von PNT-Daten untersucht und entwickelt. Ein Vorschlag, der derzeit international diskutiert wird, ist der R-Mode, oder Ranging Mode. Dieser Ansatz basiert auf der Möglichkeit, bestehende Funksysteme (MW-DGNSS, AIS, eLoran, etc.) als terrestrische, GNSS unabhängige Navigationssysteme verwenden zu können. Erste Studien, Entwicklungen und Untersuchungen wurden im Rahmen eines transnationalen EU-Projekts namens ACCSEAS (Accessibility for Shipping, Efficiency, Advantages and Sustainability) durchgeführt (2012-2015). Ein aktuelles Folgeprojekt (R-Mode Baltic) wurde in 10/2017 gestartet, mit dem Ziel, ein transnationales Testgebiet in der Ostsee zu errichten und die Weiterentwicklung von R-Mode (Land- und Bordseite) im praktischen Betrieb weiter erproben zu können.

Der vorliegende Bericht beschreibt die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Funknavigationssysteme für die See- und Binnenschifffahrt. Diese Systeme umfassen nutzbare GNSS-Konstellationen, terrestrische Funknavigationssysteme (z.B. R-Mode) sowie den integrierenden Aspekt zur Bereitstellung von zuverlässigen PNT-Daten für sicherheitsrelevante Anwendungen.

1 Einführung

Die Satellitennavigation besitzt eine immer wichtiger werdende Rolle im Bereich der Navigation der Schifffahrt. Dies gilt für maritime Anwendungen an der Küste genauso wie auch für neue Telematikanwendungen im Bereich der Binnenwasserstraßen. Die genaue Kenntnis der eigenen Position zu jedem Zeitpunkt ist Voraussetzung für eine sichere und effiziente Schiffsführung. Hierbei ist eine immer größer werdende Abhängigkeit von elektronisch ermittelten Positions-, Geschwindigkeits- und Zeitdaten an Bord von Schiffen festzustellen. Fast ausschließlich auf Satellitennavigation basierende Funknavigations-Empfänger ermitteln die Positi-

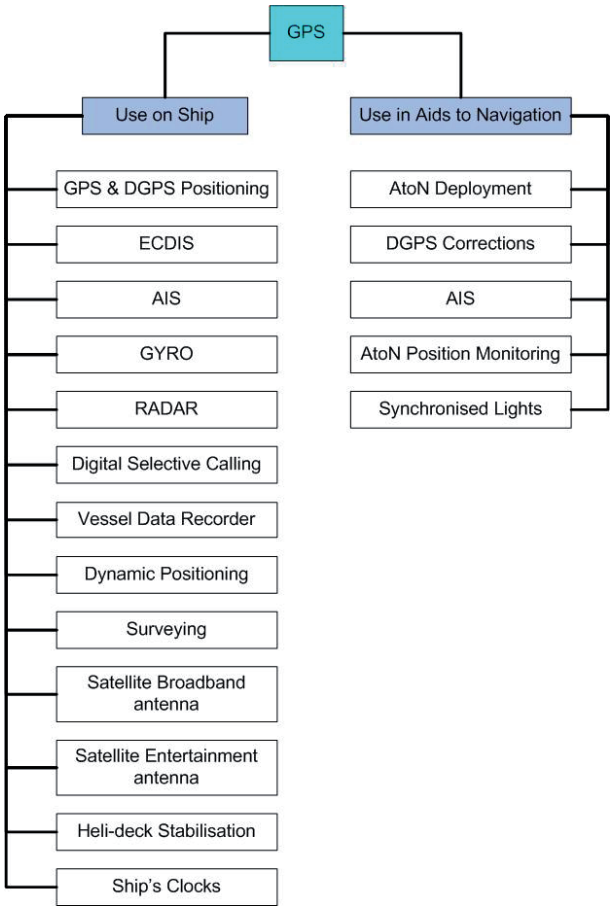


Abbildung 1: Verwendung der elektronisch ermittelten Position (zumeist GPS) an Bord von Schiffen

on, Geschwindigkeit, Zeit und Kurs (PNT-Daten) eines Schiffes. Positionsempfänger können nur Positions-, Geschwindigkeits- und Zeitdaten bereitstellen (PVT-Daten). Die Anforderungen in der Schifffahrt beinhalten jedoch auch Navigationsdaten wie z.B. die Schiffsvorausrichtung (Heading). Diese Daten werden dann allgemein als PNT-Daten bezeichnet. Diese Informationen werden sowohl für die eigene Navigation verwendet, als auch an eine Vielzahl anderer Bordsysteme wie Electronic Chart Display and Information System (ECDIS), Automatic Radar Plotting Aid (ARPA) und automatische Bahnführungssysteme weitergeleitet). Darüber hinaus werden die an Bord ermittelten Navigationsdaten auch mittels Automatic Identification System (AIS) an die umgebende Schifffahrt und landseitigen Verkehrserfassungssysteme ausgesendet (**Abbildung 1**). Die Anforderungen an die Genauigkeit, Verfügbarkeit, Kontinuität und Integrität der ermittelten Position steigen mit der Größe des Schiffes in Relation zum Fahrwasser, mit dem Tiefgang des Schiffes, insbesondere in tide-abhängigen Fahrwassern, sowie mit der Geschwindigkeit des Schiffes.

2 GNSS und DGNSS in der maritimen Schifffahrt

Gegenwärtig basiert die Positionsbestimmung zumeist auf dem amerikanischen Global Positioning System (GPS). Dieses System ermöglicht die Nutzung von bis zu 32 global verteilten Satelliten, welche zivil verfügbare Signale auf der L1 Frequenz (1575,42 MHz) abstrahlen. Nach der Abschaltung der künstlichen Verschlechterung der GPS-Signale im Jahr 2000 kann GPS derzeitig mit einer horizontalen Genauigkeit von etwa 10-15 m genutzt werden (DoD 2008). Auch Russland betreibt ein eigenes Satellitennavigationssystem mit dem Namen GLONASS, welches derzeit jedoch nur wenig in der Schifffahrt genutzt wird. Da GPS und GLONASS die Anforderungen an die Positionsgenauigkeit, Verfügbarkeit, Kontinuität und insbesondere an die Integrität derzeit nicht erfüllen, werden für die Schifffahrt weitere Unterstützungssysteme wie z.B. Differential-GPS (DGPS) verwendet. Als landgestütztes Navigationssystem betreiben im maritimen Bereich einige wenige Länder das Funknavigationssystem Loran-C. Dieses System wird derzeit jedoch nur noch selten für die Navigation in der all-

Fig. 4: Sensors, services, and sources
Proposal NCSR4 - 1

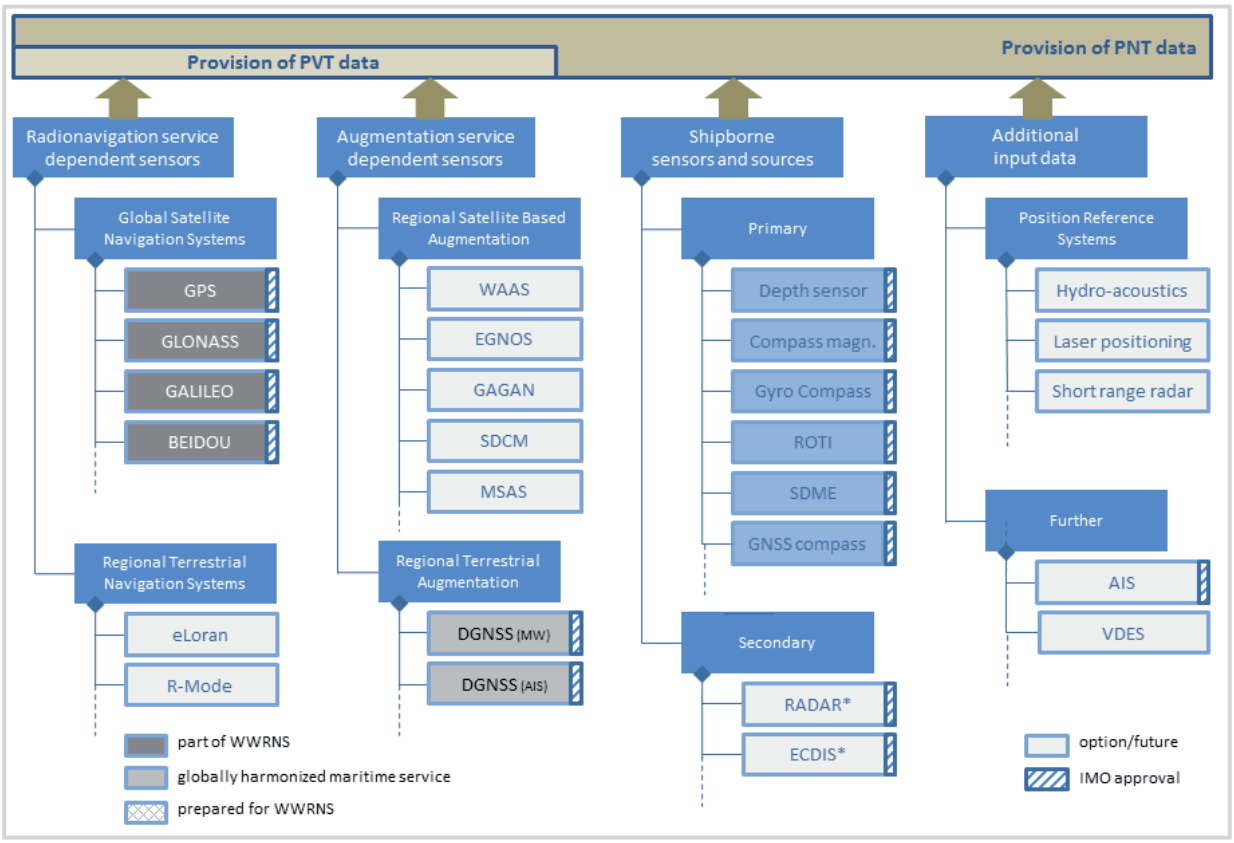


Abbildung 2: Systeme, Dienste und Sensoren in der Schifffahrt (IMO 2016)

gemeinen Seeschifffahrt verwendet. Grund hierfür sind schlechtere absolute Positionsgenauigkeiten, eingeschränkte geographische Verfügbarkeit und die Tatsache, dass moderne Empfänger erst seit kurzer Zeit verfügbar sind. Die Verwendung eines von GNSS unabhängigen terrestrischen Funknavigationssystems wird international jedoch intensiv diskutiert. Grund hierfür ist die relativ einfache Störbarkeit der empfindlichen GNSS-Signale.

2.1 Systeme, Dienste und Sensoren

Bedingt durch die zunehmende Abhängigkeit von einer elektronisch ermittelten Position an Bord der Schiffe (siehe Abbildung 1) steigt der Bedarf an einer „sicheren Position“. Zur Gewährleistung einer sicheren Position hat die International Maritime Organisation (IMO) operationelle Anforderungen für die Bordseite und für die Systembetreiber von Funknavigationssystemen festgelegt (IMO 2001). Eine sichere Position wird erreicht durch:

- Erfüllung der operationellen Nutzeranforderungen der IMO A.915(22) an die Bordseite hinsichtlich Genauigkeit, Verfügbarkeit, Kontinuität und Integrität.

- Verwendung von Funknavigationssystemen, welche von der IMO als Bestandteil eines World-Wide Radionavigation System (WWRNS) anerkannt worden sind.

- Verwendung von international standardisierten Funkübertragungsverfahren.

Funknavigationssysteme, die als eine Komponente des WWRNS anerkannt werden, müssen die Anforderungen der IMO erfüllen (IMO 2011). Die derzeitigen und zukünftigen Systeme, welche als Komponente eines WWRNS im maritimen Bereich zur Ermittlung einer sicheren Position verwendet werden könnten, sind in **Abbildung 2** dargestellt. Ebenfalls enthält die Darstellung eine Übersicht über die in der maritimen Schifffahrt verwendeten Sensoren, die einen Beitrag zur Bestimmung von PNT-Daten liefern können.

Mittlerweile sind die Satellitennavigationssysteme GPS, GLONASS, Galileo und Beidou als Komponenten eines WWRNS anerkannt. In der Praxis findet man derzeit jedoch fast nur GPS oder kombinierte GPS/GLONASS-Empfänger an Bord von Schiffen.

Bei den landgestützten Augmentierungssystemen zur Übertragung von GNSS Korrekturdaten und Integritätsinformationen ist das DGNSS über Mittelwelle (MW) der zurzeit anerkannte maritime Standard. Ebenfalls existieren auch für die DGNSS-Korrekturdatenübertragung über AIS entsprechende maritime Standards. Beide Systeme erfüllen somit grundsätzlich die Anforderungen, um zukünftig als Komponente des WWRNS anerkannt werden zu können. Die Betreiber von EGNOS arbeiten derzeit an einer Anerkennung als WWRNS sowie an den erforderlichen maritimen Leistungsstandards um eine zukünftige Verwendung von EGNOS-Empfängern an Bord von Schiffen zu ermöglichen.

2.2 Maritime Anforderungen

Die International Maritime Organisation (IMO) definiert operationelle Anforderungen an die Betreiber von Funknavigationssystemen. Um den Status eines von der IMO anerkannten weltweiten Funknavigationssystems (WWRNS) zu erhalten, muss das Navigationssystem die operationellen Anforderungen der IMO gemäß IMO Resolution A.1046(27) erfüllen (IMO 2011). In dieser Resolution klassifiziert die IMO drei Typen von Seegebieten, die sich mit Hinblick auf die operationellen Anforderungen unterscheiden (siehe **Tabelle 1)**. Darüber hinaus formuliert die IMO in ihrer Resolution A.915(22) minimale operationelle Anforderungen an die Bordseite mit Hinblick auf die allgemeine Navigation (siehe **Tabelle 2**).

Navigation Area	Absolute horizontal Accuracy	Signal Availability	Continuity	Integrity warning of system malfunction	Position Update Rate
Navigation In Ocean Waters	≤100 m (95%)	>99.8%	-	as soon as practicable	2 s
Navigation In Harbour Entrances, Harbour Approaches And Coastal Waters	≤10 m (95%)	>99.8% (2 Jahre)	≥99.97% (15 Minuten)	< 10 s	2 s

Tabelle 1: Operationelle Anforderungen gemäß (IMO 2011) für den Maritimen Bereich

Navigation Phase	System level parameters				Service level parameters			
	Genauigkeit	Integrität			Verfügbarkeit (a 30 Tage)	Kontinuität (15 Min.)	Abdeckung	Intervall
	horizontal	Alarmierungsgrenze	Alarmierungszeit	Integritätsrisiko (a 3 Std.)				
Offene See	10 m	25 m	10 s	10-5	99,8 %	k.A.	Global	1 s
Küstenbereich	10 m	25 m	10 s	10-5	99,8 %	k.A.	Global	1 s
Hafenzufahrt und eingeschränkte Seegebiete	10 m	25 m	10 s	10-5	99,8 %	99.97 %	Regional	1 s
Hafen	1 m	2,5 m	10 s	10-5	99,8 %	99.97 %	Lokal	1 s
Binnenwasserstraßen	10 m	25 m	10 s	10-5	99,8 %	99.97 %	Regional	1 s

Tabelle 2 : Minimale operationelle Anforderungen an die Bordseite mit Hinblick auf die allgemeine Navigation (IMO 2001)

2.3 R-Mode als potentielles Ersatzsystem zu GNSS

Die zunehmende Abhängigkeit von der Satellitennavigation wirft immer wieder die Frage auf, ob für sicherheitsrelevante navigatorische Anwendungen Ersatzsysteme erforderlich sind. Wie bereits beschrieben, basiert gegenwärtig die Positionsbestimmung zumeist auf Satellitennavigationssystemen wie dem amerikanischen GPS und dem russischen GLONASS. Zukünftig werden weitere Satellitennavigationssysteme nutzbar sein (Galileo und Beidou), welche die Anzahl der zur Verfügung stehenden Satelliten weiter erhöhen wird. Alle Satellitensysteme (GNSS) verwenden dabei ähnliche Signalstrukturen, Sendefrequenzen und Leistungen. Die Anfälligkeit und Störbarkeit von GNSS wurde ausführlich im Volpe Report analysiert und bewertet (Volpe 2001). Als Ergebnis wurde empfohlen, dass für sicherheitskritische Anwendungen ein Ersatzsystem vorgehalten werden sollte. Ebenfalls hat die IALA (International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities) in Ihrer Empfehlung R-129 auf das Problem der GNSS-Anfälligkeit hingewiesen und empfiehlt die Verwendung von terrestrischen Ersatzsystemen für sicherheitskritische Anwendungen (IALA 2007). Auch die Weltschifffahrtsbehörde IMO erarbeitet gegenwärtig eine umfassende Strategie für die e-Navigation. Die IMO hatte ebenfalls die Notwendigkeit eines GNSS-unabhängigen, terrestrischen Funknavigationsverfahrens anerkannt (IMO 2007). In einem Eingangspapier zum IALA e-Navigation Committee hat die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) vorgeschlagen, die bereits global vorhandenen Verfahren der MW-DGNSS-Korrekturwertaussendung und das AIS jeweils um eine so genannte Ranging-Mode-Komponente (R-Mode), basierend auf präzisen GNSS unabhängigen Zeitsignalen, zu ergänzen (Oltmann und Hoppe 2008). Diese Systemidee wird international unterstützt und eine entsprechende Weiterentwicklung der Systemidee befürwortet. Um eine möglichst große Akzeptanz auch im internationalen Rahmen für diesen Systemvorschlag zu erhalten, wurde die Entwicklung des R-Mode für MW-DGPS und AIS im Rahmen eines europäischen Forschungsprojektes ACCSEAS (Accessibility for Shipping, Efficiency, Advantages and Sustainability) durchgeführt. Eines der wesentlichen Arbeitspakete seitens der WSV war hierbei die Durchführung einer Machbarkeitsstudie zum R-Mode, in der wesentliche Grundlagen für die Entwicklung und Erprobung des R-Modes unter Verwendung von Aussendungen über MW-DGPS und AIS entwickelt wurden. Desweiteren konnte ein erstes Verfahren, auf der Basis von MW-R-Mode-Aussendungen, in einem Testpiloten erfolgreich validiert werden. Die Studie wurde in drei Teilbereiche aufgeteilt, um jeweils die Möglichkeiten der Aussendungen über MW und AIS sowie deren Kombination getrennt zu untersuchen.

2.3.1 Das ACCSEAS-Projekt

Im europäischen Verbundprojekt ACCSEAS (2011-2015) wurde die Systemidee des R-Mode-Verfahrens im Rahmen einer Machbarkeitsstudie vertiefend untersucht und erstmalig in einem Testgebiet erprobt.

Die ACCSEAS Machbarkeitsstudie wurde in die folgenden Teilaspekte unterteilt:

- Teil 1 und 2 untersuchten das R-Mode Verfahren basierend auf dem MW-DGNSS Signal (Johnson et al 2014); die für dieses Verfahren empfohlene Methode ist es, CW-Signale in das DGNSS-Signalspektrum zu mischen und den Pseudorange aus der Trägerphase zu entwickeln.

- Teil 3 und 4 untersuchten das R-Mode Potential des AIS Signals (Johnson et al 2014); der empfohlene Ansatz hier ist es, den Pseudorange aus den Bitübergängen zu schätzen. Dies erfordert keine Änderung der vorhandenen Signalstruktur.

- Teil 5 untersuchte die Kombination von unterschiedlichen R-Mode Verfahren (MW, AIS und eLoran), (Johnson et al 2014).

Das Projekt ACCSESS ACCSEAS wurde 2015 abgeschlossen. Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse sind unter [www.accseas.eu] verfügbar.

2.3.2 R-Mode via MW-DGNSS

Die in der Studie empfohlene Lösung für Aussendungen über die MW ist eine Variante, welche das existierende MSK-Signal mit CW-Signalen überlagert. Die TOA-Performance (TOA = Time of Arrival) wird über Trägerphasenmessungen der CW-Signale erreicht, deren Mehrdeutigkeiten z.B. über die Aussendung bekannter Meldungen bestimmt werden können. Die Streckenmessgenauigkeit wird ebenfalls von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, die in der Studie untersucht wurden (Johnson und Swaszek, Part II 2014). Zu den Einflussgrößen zählen die Stabilität der Synchronisation, die Interferenz durch das von der Ionosphäre reflektierte Signal (Raumwelle), Unterschiede in der Bodenwellenausbreitung, Interferenzen von anderen DGNSS-Stationen auf derselben Sendefrequenz und die Geometrie der sendenden MW-DGNSS-Stationen. In der durchgeführten Analyse zur erreichbaren Positionsgenauigkeit wurde angenommen, dass eine Zeitstabilität im Bereich von einer Nanosekunde (ns) und eine Zeitsynchronisation von 50-100 ns zu einer gemeinsamen Zeitreferenz wie UTC erzielbar sind. Die Raumwelle hat einen großen Einfluss auf die Positionierungsgenauigkeit, so dass separate Ergebnisse für den Tag und die Nacht ausgewiesen wurden (Abbildung 3). Zusammenfassend kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass R-Mode-Aussendungen über MW-DGNSS ein großes Potential für ein zukünftiges terrestrisches und GNSS-unabhängiges Navigationssystem aufweisen. Die Studie enthält ebenfalls Hinweise für die Realisierung einer Testumgebung zur Durchführung von realen Messungen. Hierfür wurden Konzeptvorschläge für die Entwicklung von sende- und empfangsseitigen R-Mode-Komponenten erarbeitet. Erste praktische Messungen zu einfachen Entfernungsmessungen konnten die theoretischen Annahmen und Berechnungen validieren.

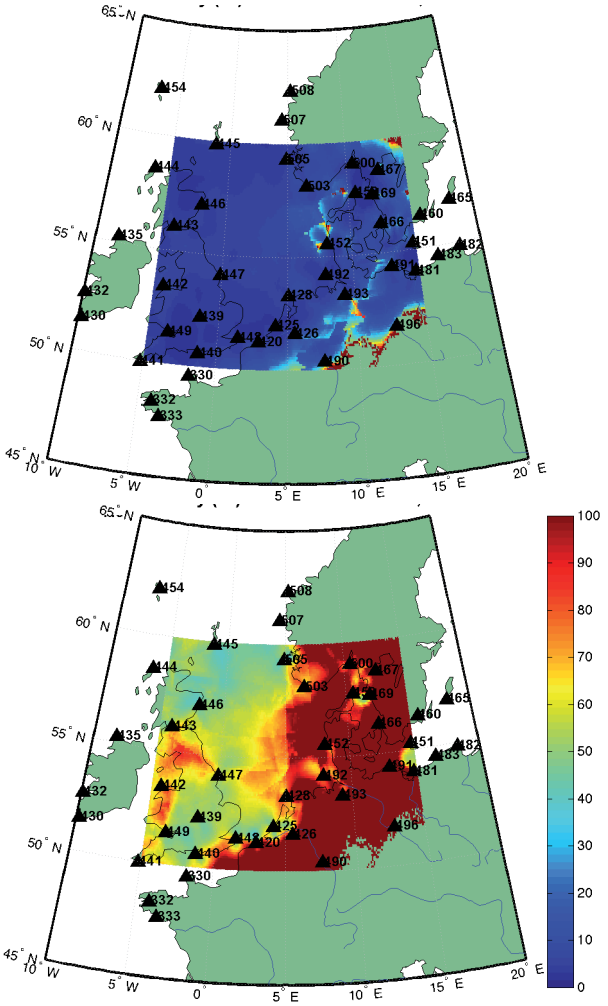


Abbildung 3: Prädizierte R-Mode Positionierungs-genauigkeit in der Nordsee tagsüber (oben) und nachts (unten) in Meter (Skala 0-100m), (Johnson und Swaszek, Part II 2014)

2.3.3 R-Mode via Automatic Identification System (AIS)

Im Rahmen der in ACCSEAS durchgeführten Machbarkeitsstudie wurde ebenfalls die Nutzung von Aussendungen mittels AIS im VHF-Seefunkband (156.025 - 162.025 MHz) untersucht. Hierbei wird bei AIS bereits ein synchronisiertes Zeitschlitzverfahren (TDMA) verwendet. In der Studie wurden mehrere Methoden zur Verwendung von AIS untersucht (Johnson und Swaszek, Part IV 2014). Als geeignetste Methode wurde eine Verwendung des bestehenden AIS-Standards mit dezidierten Nachrichteninhalten bewertet. Sie basiert darauf, dass ein AIS-Empfänger sowohl die Zeiten der Bitüber-

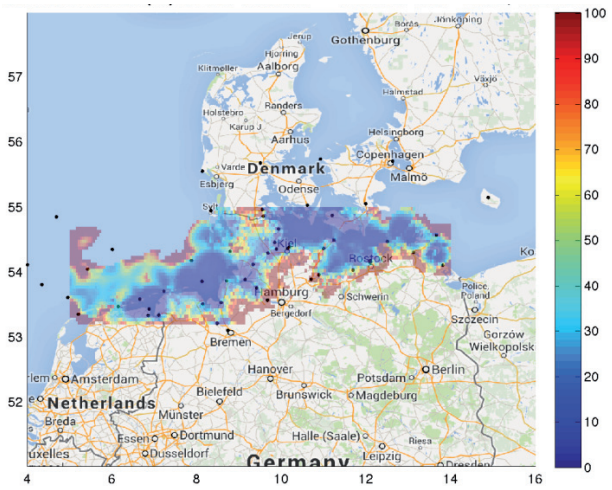


Abbildung 4: Vorhersage der Positionsgenauigkeit (m) mittels AIS-Signal, (Johnson und Swaszek, Part IV 2014)

gänge als auch die Trägerphase aller verfügbaren AIS-Basisstationssignale ermitteln. Hierbei ist die Aussendung von bekannten Dateninhalten (z.B. vom Typ 4 oder 8) notwendig. Diese können zeitlich und inhaltlich vorhergesagt werden, wodurch störende Signalzufälligkeiten minimiert werden können. Insbesondere die Aussendung von Nachrichten des Typs 8 (binäre Datenaussendung) ermöglicht längere und häufigere Übertragungen mit fester Struktur.

Bei der Nutzung als Kommunikationskanal muss ein AIS-R-Mode-Empfänger in der Lage sein, das Sendesignal mit hoher Genauigkeit zu demodulieren. Abbildung 4 zeigt die erreichbare Positionsgenauigkeit bei Verwendung von Messungen der AIS-Bitübergänge. Hierbei wurden nur AIS-Basisstationen mit einer Signalstärke > -117 dBm und einer Maximaldistanz von 75 km zwischen Sender und Empfänger genutzt. Desweiteren wurde eine Übertragung von Typ 8 Meldungen mit insgesamt 1280 Bit zu Grunde gelegt. Zusammenfassend kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass die Verwendung des vorhandenen und standardisierten AIS-Signals mit der Methode der Messung von Bitübergängen gute Genauigkeiten im küstennahen Bereich bereitstellen kann. Somit können R-Mode-Aussendungen via AIS ebenfalls einen wichtigen Beitrag für die Bereitstellung eines zukünftigen terrestrischen und GNSS-unabhängigem Navigationssystems leisten. Praktische Messungen zu dieser Methode konnten bisher noch nicht durchgeführt werden.

2.3.4 Kombination verschiedener R-Mode-Aussendungen

In diesem Teil der Studie wurde die Kombination von MW-DGNSS, AIS als auch die Verwendung von eLoran untersucht. Wesentliches Ziel dieses Ansatzes ist die Verbesserung der Positionslösungen durch die Kombination von R-Mode-Signalen. Dieses Prinzip wird auch als SoOP (Signals of Opertunity) bezeichnet. Im Hinblick auf dieses Ziel wird das Konzept eines “All-in-View”-Empfängers beschrieben, welcher die Signale von zwei oder mehr R-Mode Quellen kombiniert. Eine weitere wichtige Betrachtung ergibt sich, wenn auch die Schiffsverkehrsdichte mit einbezogen wird. Die Leistungsfähigkeit eines zukünftigen GNSS-Backup-Dienstes ist in solchen Regionen am kritischsten, in denen eine hohe Verkehrsdichte besteht. Abbildung 5 zeigt zur Veranschaulichung dieses Sachverhalts die vorhergesagte Genauigkeit unter Verwendung der R-Mode Systeme MW-DGNSS, AIS sowie einer eLoran-Station auf Sylt. Aufgrund der großen Anzahl an AIS- und MW-DGNSS-Stationen in Bereichen mit hoher Verkehrsdichte kann eine Bereitstellung des R-Mode mit hoher Genauigkeit in diesen Gebieten erreicht werden.

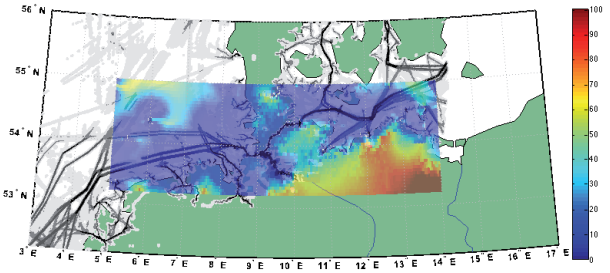


Abbildung 5: R-Mode-Genauigkeit über der Schifffahrts-Verkehrsdichte. Schifffahrtsdichte in Graustufen (je dunkler desto mehr Verkehr), (Johnson und Swaszek, Part V 2014)

3 Entwicklungen in der Binnenschifffahrt

In den letzten Jahren ist ein zunehmendes Interesse an einer effektiveren Nutzung der Binnenwasserstraßen festzustellen. Dieses resultiert in einer Vielzahl neuer Entwicklungen und Systemen rund um die Wasserstraßen. Systeme in diesem Zusammenhang werden allgemein unter dem Schlagwort RIS (River Information Services) geführt. Eine grundlegende Verbesserung der technischen Ausrüstung in der Binnenschifffahrt ergab sich insbesondere durch die Entwicklung, Standardisierung und Einführung der elektronischen Flusskarte „Inland ECDIS“. Weiterhin hat die Entwicklung von AIS sich als ein nützliches Werkzeug zum Austausch von navigatorischen Daten zwischen verschiedenen Schiffen bzw. zwischen Schiffen und Verkehrszentralen erwiesen. Eine bedeutende Grundlage zur Anwendung solcher neuen telematischen Systeme ist die Nutzung von GNSS und entsprechender Differentialsysteme (DGNSS), welche die notwendige Genauigkeit und Integrität für die Telematiksysteme zur Verfügung stellen (Hoppe, 2006). Neben den bereits etablierten telematischen Anwendungen, wie es die Inland-ECDIS im Navigationsmodus bzw. die Aussendung

der eigenen Schiffsposition über AIS darstellen, werden in verschiedenen europäischen Projekten weitere zukünftige Anwendungen in sicherheitsnavigatorischen Bereichen erprobt und untersucht (z.B. Forschungsprojekt LAESSI). Solche Anwendungen sind z.B. Kollisionsverhütungssysteme, automatische Bahnführungssysteme, Brückenanfahrwarnsysteme und Anlegeassistenten. Eine zuverlässige, sichere und präzise Positionsbestimmung sowie die Möglichkeit die eigene Schiffsvorausrichtung (Heading) bestimmen zu können ist für die gegenwärtigen und zukünftigen telematischen Anwendungen von großer Bedeutung.

3.1 Ausrüstungs- und Anforderungssituation

3.1.1 Inland ECDIS

Wie bereits erwähnt, war eine wesentliche Verbesserung die Entwicklung und Einführung der Inland ECDIS und des entsprechenden Standards, der mit dem bestehenden maritimen ECDIS kompatibel ist. Beim Einsatz der Inland-ECDIS im "Navigationsmodus" wird die genaue Position des Schiffes in Bezug zur Fahrwasserbegrenzung angezeigt. Die Entwicklung des Innland-ECDIS-Standards basiert auf der Idee, Tiefeninformationen in einer einer elektronischen Karte bereitzustellen (Krajewski et al. 2002). Innerhalb des Standards werden zwei Arten von Anwendungen beschrieben:

- Informationsmodus
- Navigationsmodus

Im Informationsmodus wird die elektronische Karte ohne das überlagerte Radarbild dargestellt. Der Schiffsführer kann diesen Modus nutzen, um generelle Informationen über die Wasserstraße zu erhalten oder um eine Fahrtroute vorzubereiten. Der Informationsmodus stellt sehr geringe Anforderungen an Positionsgenauigkeit, Verfügbarkeit und Integrität. Daher reicht der Einsatz eines einfachen GPS-Empfängers aus, um die Karte auf einem handelsüblichen Rechner zu positionieren. **Abbildung 6** zeigt eine Inlands-ECDIS-Karte im Informationsmodus. Der Informationsmodus darf nicht für Navigationszwecke verwendet werden.

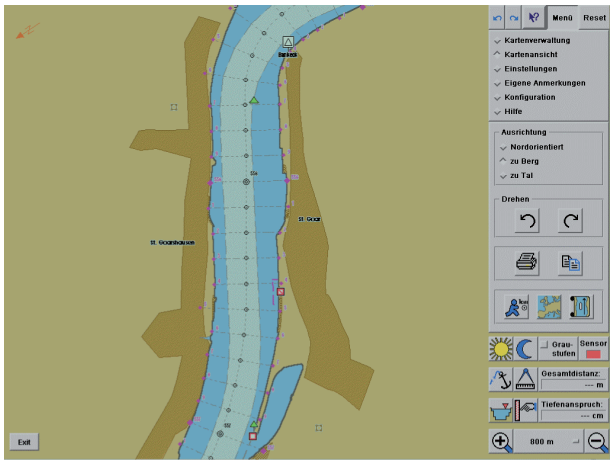


Abbildung 6: Inland ECDIS im Informationsmodus

Bei Verwendung des Inland ECDIS im Navigationsmodus wird das Radarbild der ECDIS-Karte überlagert (siehe **Abbildung 7**). Im Navigationsmodus werden entsprechend hohe Anforderungen an das Positionierungssystem hinsichtlich Genauigkeit, Verfügbarkeit, Kontinuität und Integrität gestellt.

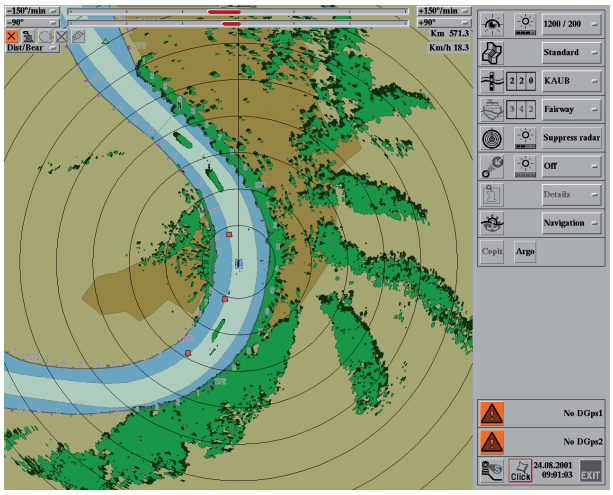


Abbildung 7: Inland ECDIS im Navigationsmodus mit überlagertem Radarbild

3.1.2 Inland-AIS

Das Automatic Identification System (AIS) ist ein Datenfunksystem, das statische, dynamische und reisebezogene Schiffsdaten zwischen Schiffen sowie zwischen Schiffen und Landstationen austauschen kann. Schiffsseitige AIS-Mobilgeräte übertragen in regelmäßigen Abständen die Identität, Position und andere Daten des Schiffes. Die umgebende Schifffahrt empfängt diese Meldungen und kann die Informationen auf einem geeigneten Display wie Radar oder Inland-ECDIS darstellen. Damit können andere Verkehrsteilnehmer lokalisiert, identifiziert und verfolgt werden (ZKR 2011). Der Inland-AIS-Standard wurde entwickelt, um die spezifischen Anforderungen der Binnen-schifffahrt zu erfüllen und gleichzeitig die volle Kompatibilität mit dem maritimen AIS (auf Basis der IMO-Anforderungen) zu gewährleisten.

Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) hat mittlerweile ein AIS-Netz eingerichtet, welches sowohl die Küste als auch wichtige Binnenwasserstraßen wie Rhein, Mosel, Donau, Main und Main-Donau-Kanal abdeckt. Es ist geplant, diese Abdeckung in den nächsten Jahren

noch weiter auszubauen, um eine landesweite AIS-Landinfrastruktur entlang der meisten Binnenwasserstraßen zu ermöglichen. Darüber hinaus besteht eine Ausrüstungspflicht auf Rhein und Mosel seit 2015 (ZKR 2015). Diese ist 2017 auf alle Schiffe auf deutschen Binnenwasserstraßen ausgeweitet worden.

Die beschriebenen Anwendungen haben unterschiedliche Anforderungen in Bezug auf Positionsgenauigkeit, Verfügbarkeit, Kontinuität und Integrität, die in den entsprechenden Leistungsstandards für Inland-AIS (ZKR 2006) und Inland-ECDIS (ZKR 2003) aufgeführt sind (siehe **Tabelle 3**).

Application	**Position accuracy [m]**	**Integrity**
Inland ECDIS Navigation Mode	< 5 (absolute) < 5 (1 σ)	Detection on errors > 3 σ within 30 seconds
Information Mode	-	-
Inland AIS		
- Medium-term ahead	15-100	-
- Short-term ahead	10	-
- Lock/Bridge operation	1	-

Tabelle 3: Inland-ECDIS und Inland AIS Anforderungen an die Positionsgenauigkeit

Um die erforderliche Positionsgenauigkeit und Integrität für Inland-AIS und Inland-ECDIS im Navigationsmodus zu gewährleisten, hat die WSV in 2005 einen DGNSS-Dienst auf deutschen Binnenwasserstraßen eingerichtet (Hoppe et al 2006). Dieser Dienst basiert auf dem DGNSS-Dienst auf Basis des IALA Standards (IALA 2015). Dieser Dienst ermöglicht die Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit von 1-3 m, die geforderte Verfügbarkeit und die Aussendung von Integritätsinformationen um auftretende Systemfehler in weniger als 10 Sekunden an den Nutzerempfänger übermitteln zu können.

3.2 Zukünftige Entwicklungen

Neben den etablierten Anwendungen (wie oben beschrieben) werden in verschiedenen Forschungsprojekten neue Fahrerassistenzsysteme entwickelt, um die Sicherheit der Navigation weiter zu verbessern und die Basistechnologien für ein zukünftiges autonomes Binnenschiff zu erproben. Eines dieser Forschungsprojekte ist LAESSI (Leit- und Assistenzsysteme zur Erhöhung der Sicherheit der Schifffahrt auf Inlandwasserstraßen). Ziel des Projektes LAESSI ist es, den Schiffsführer bei seinen Navigationsaufgaben zu unterstützen und damit die Binnenschifffahrt sicherer und effizienter zu machen. Um dieses Ziel zu erreichen, nutzt LAESSI modernste GNSS-Navigationstechnologien, Nahbereichssensoren und neue Datenübertragungstechniken. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projektes werden effiziente Assistenzsysteme für die Binnenschifffahrt entwickelt. Im Einzelnen konzentriert sich das Projekt auf die Entwicklung folgender Fahrerassistenzfunktionen:

- Das Brückenanfahrwarnsystem warnt die Schiffsführung, wenn das Schiff, das Steuerhaus oder der Radarmast nicht sicher eine Brücke passieren können. Eine solche Warnung muss mehrere hundert Meter vor Erreichen der Brücke erfolgen, um eine ausreichende Reaktionszeit zu gewährleisten.

	Brückenanfahrwarnung	**Automatische Bahnführung**	**Anlegeassistent**	**Conning Anzeige**
Positions-Genauigkeit [cm]	20	30	10	20
Höhen Genauigkeit [cm]	10	not relevant	not relevant	not relevant
Heading Genauigkeit [°]	0,3	0,17	0,07	0,1
Integritäts-Risiko	$10\ 10^{-5}$ / 2 min $30\ 10^{-5}$ / 8 min	$0{,}55\ 10^{-5}$ / 3 h	$18\ 10^{-5}$ / 10 min	$18\ 10^{-5}$ / 1 h
Time to Alarm [s]	4 6	2	6	6

Tabelle 4: Anforderungen an die LAESSI Assistenzfunktionen

- Für den Anlegeassistenten muss die Position und Schiffsvorausrichtung (Heading) sowie die Umgebung des Schiffes mit hoher Genauigkeit bekannt sein. Die Schiffsführung sollte eine genaue Darstellung der aktuellen Manöversituation, insbesondere der aktuellen Entfernungen zu Anlegern sowie anderen Schiffen dargestellt bekommen.

- Der Bahnführungsassistent entlastet die Schiffsführung während der Navigation auf der geplanten Route des Schiffes. Eine hochgenaue und integritätsgeprüfte Positionsformation (3D) dient als Grundlage für diese Assistenzfunktion.

- Die Conning-Anzeige stellt die Bewegungen des Schiffes in übersichtlicher Form dar. Insbesondere muss die Schiffsführung rechtzeitig über die relevanten Änderungen der Bewegung informiert werden. Neben einer sehr genauen Positions- und Lageinformation des Schiffes ist es ebenfalls wichtig, die Informationen aus den Antriebssystemen sowie den Einfluss von Wind und Strömung zu berücksichtigen.

Die wesentliche Grundlage für die genannten Assistenzfunktionen ist die Bereitstellung zuverlässiger und umfassender nautischer Informationen. Dazu gehören die Position, Lage und Bewegung des eigenen Schiffes mit den dazugehörigen Integritätsinformationen, genaue und gültige elektronische Karten sowie Informa-tionen über die Situation im Fahrtgebiet (Baustellen, Unfälle, Wasserstände) und genaue Daten der Infrastruktur (z.B. Abmessungen der Brücken und Schleusen).

Tabelle 4 enthält die Genauigkeits- und Integritätsanforderungen für die verschiedenen Assistenzfunktionen. Die Grundidee einer Brückenkollisionswarnung besteht darin, die geodätische Höhe des Schiffes mit der geodätischen Höhe einer Brücke zu vergleichen. Daraus ergeben sich entsprechende Anforderungen an die Höhenmessung. Position und Kurs werden als Grundlage für die Vorhersage der Schiffsbewegung im Nahbereich verwendet, wobei hohe Anforderungen an die Positions- und Kursgenauigkeit an den Anlegeassistenten gestellt werden. Diese basieren auf der Anforderung, dass jeder Punkt eines 185 m langen Binnenschiffs mit einer Genauigkeit von 30 cm bekannt sein muss. Das Integritätsrisiko basiert weiterhin auf der Annahme, dass ein nicht erkannter Fehler innerhalb von 3 Jahren nach Normalbetrieb noch toleriert werden kann. Die Alarmierungszeit (Time to Alarm) ist besonders beim Anlegeassistenten ein kritischer Wert, obwohl sich das Schiff in dieser Situation mit niedriger Geschwindigkeit einem Anleger annähert. Die im Projekt entwickelten Assistenzfunktionalitäten konnten in einer Abschlussdemonstration erfolgreich vorgeführt werden. Die in LAESSI entwickelten Anwendungen liefern weiterhin wesentliche Erkenntnisse und Basisentwicklungen für eine zukünftige teilautonome Binnenschifffahrt. Weitere Forschungsprojekte in diesem Zusammenhang sind geplant.

4 Referenzen

CCNR: Electronic Chart Display and Information System for Inland Navigation, Edition 1.02, 16.10.2003, Section 4

CCNR: Vessel Tracking and Tracing Standard for Inland Navigation, Edition 1.0, 31.5.2006

CCNR: Leaflet on AIS, Edition 2011

Department of Defense: Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard, 4Th Edition, September 2008

Hoppe, M.: Differential Global Navigation Satellite System for telematic applications on inland waterways, PIANC Conference, Estoril, Mai 2006

IALA: Recommendation R-121 on the Performance and Monitoring of GNSS Services in the Frequency band 283.5-325 kHz, 2015

IMO Resolution A.1046(27): WORLD-WIDE Radionavigation System, adopted on 30 November 2011

IMO: Draft Guidelines for shipborne Position, Navigation and Timing (data processing) Unit, Input to NCRS 4.2, November 2016

Johnson, G.W., Swaszek P. F.: Part I and II Feasibility Study of R-Mode using MF DGPS Transmissions, March 2014.

Johnson, G.W., Swaszek, P. F.: Part III and IV Feasibility Study of R-Mode using MF DGPS Transmissions, August 2014.

Johnson, G.W., Swaszek, P. F.: Part V Feasibility Study of R-Mode combining MF DGNSS, AIS, and eLoran Transmissions, September 2014.

Krajewski, C., Haberkamp, H., “Inland ECDIS Standard”, XVth IALA

CONFERENCE, SYDNEY 2002.

Oltmann, J.-H., Hoppe, M.: Contribution to the IALA World Wide Radio Navigation plan (IALA-WWRNP) / Recapitalization of MF DGNSS Systems, ENAV4-7.10A, ENAV4-7.10B, Shanghai, 2008

Porathe: "ACCSEAS Baseline and Priorities Report," 2013.

Sandler, M., Heßelbarth, A., Ziebold, R., Uhlemann, M., Alberding, J., Bröschel, M., Hoppe, M.: Setting up driver assistance functions for inland vessels based on high precision and integrity checked positioning information, DGON ISIS/MTE, Hamburg, August 2016

Volpe, John A.: National Transportation Systems Centre, Vulnerability Assessment of the Transportation Infrastructure Relying on the GPS, Final Report, 2001

Erfassung, Analyse und Vergleich des dynamischen Fahrverhaltens von größen- und tiefgangsrelevanten Fahrzeugen auf Unter- und Außenelbe

von Prof. Dr.-Ing. T. Albers[1] , B. Reiter[2], F. Treuel[3], H. Jansch[4] und J. Behm[5]

Abstract

Aufgrund stetig zunehmender Schiffsabmessungen ist die Unterkielfreiheit in den letzten Jahren zu einem limitierenden Faktor für den Verkehr auf der Wasserstraße Elbe geworden. Begrenzte Fahrwassertiefen führen dazu, dass große Container- oder Massengutschiffe den Hamburger Hafen zum Teil nur tideabhängig anlaufen können und die Anfahrt nach einem von der Wasser- und Schifffahrtsstraßenverwaltung geführten Tidefahrplan geregelt wird. Um eine optimale, wirtschaftliche Nutzung des Elbefahrwassers zu gewährleisten, werden zuverlässige, revierspezifische Werte für das dynamische Fahrverhalten von größen- und tiefgangsrelevanten Schiffen benötigt.

Im Auftrag des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes Hamburg und in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Wasserbau sowie der Technischen Universität Hamburg hat die Ingenieurgesellschaft von Lieberman in einer umfangreichen Messkampagne das dynamische Fahrverhalten von größen- und tiefgangsrelevanten Fahrzeugen auf der Revierfahrt von Unter- und Außenelbe erfasst. Insbesondere wurde dabei der tatsächliche Squat ermittelt und anschließend anhand z.B. nautischer und betriebstechnischer Parameter analysiert. Parallel wurden weitere hydrologische und hydrodynamische Größen für die Berechnung des Squat nach Rechenansatz des Tidefahrplanprogramms Elbe bestimmt. Anschließend wurde der tatsächliche Squat mit dem berechneten Squat verglichen. Die Erfassung der relevanten Parameter zum dynamischen Fahrverhalten erfolgte direkt auf dem Bemessungsschiff während der Revierfahrt. Weitere benötigte hydrologische und hydrodynamische Parameter wurden zeitgleich von einem Begleitfahrzeug aus in Vorausfahrt erfasst.

Insgesamt wurden 19 Messfahrten auf 6 verschiedenen Containerschiffstypen mit Längen zwischen 294 m und 400 m durchgeführt. Dabei fanden für jeden Schiffstyp in der Regel zwei auslaufende und eine einlaufende Messfahrt statt. Hinzu kamen 2 Messfahrten auf Massengutfrachtern der Capesize-Klasse. Die Messkampagne fand zwischen dem 06.09.2013 und dem 16.08.2016 statt. Die Bemessungsschiffe wurden zwischen ihrem Liegeplatz im Hamburger Hafen und Tonne 11 bei Elbe-km 750 nördlich von Scharhörn bzw. in umgekehrte Richtung messtechnisch begleitet (Abbildung 1). Die Messungen wurden an Bord der Bemessungsschiffe selbst sowie auf einem Begleitfahrzeug durchgeführt, das die Bemessungsschiffe auf der Revierfahrt vom Hamburger Hafen bis Tonne 11 oder in umgekehrte Richtung eskortierte.

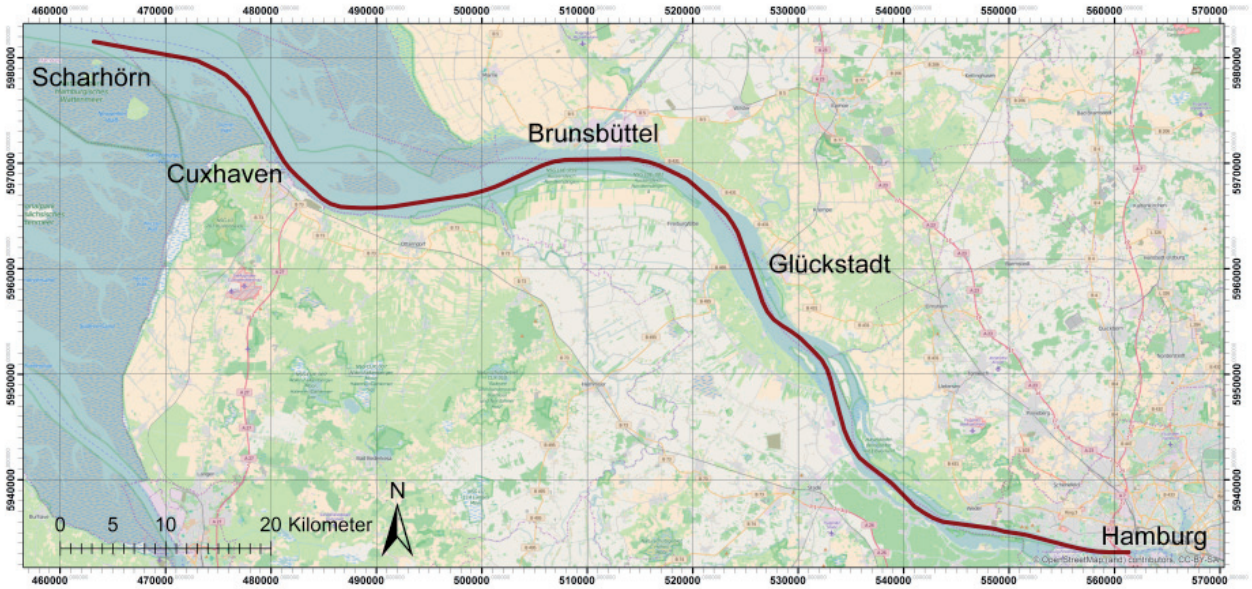


Abbildung 1: Übersicht über die Messstrecke

1 Ostfalia Hochschule, Campus Suderburg, E-Mail: t.albers@ostfalia.de
2 Ingenieurgesellschaft von Lieberman, Hamburg
3 Technische Universität Hamburg
4 Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg
5 Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hamburg

An Bord der Bemessungsschiffe wurden sechs hochpräzise GNSS-Empfänger installiert, um die Positionen und 3D-Bewegungen der Schiffe mit einer Frequenz von 2 Hz aufzuzeichnen. Die Geräte wurden jeweils an Steuerbord und Backbord an Bug, Heck und auf den Nocken installiert (Abbildung 2 und 3). Die Daten ermöglichten die Berechnung von Trimmung und Krängung, Geschwindigkeit und Kurs über Grund, Vorausrichtung usw. Das Begleitschiff wurde verwendet, um den lokalen Salzgehalt und die Temperatur des Wassers (unter Verwendung einer CTD-Sonde), die lokale aktuelle Geschwindigkeit über Grund und die Vorausrichtung (berechnet aus 2 weiteren GNSS-Empfängern auf dem Begleitfahrzeug) sowie die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung (unter Verwendung eines Doppler Velocity Log DVL) zu erfassen. Über die Daten der CTD-Sonde konnte die sich über die Revierfahrt verändernde Dichte des Wassers bestimmt werden. Aus den aufgezeichneten Strömungsparametern und der Geschwindigkeit über Grund sowie der Vorausrichtung des Bemessungsschiffes konnte die Geschwindigkeit durch das Wasser errechnet werden. AIS-Signale wurden aufgezeichnet, um Daten über Begegnungen und Überholvorgänge von anderen Schiffen zu sammeln und im Anschluss in die Auswertung einzubeziehen. Aus Daten der Voyage Data Recorder der Bemessungsschiffe wurden zusätzliche Informationen über die Betriebsparameter gewonnen (u.a. Schraubendrehzahl, Ruderlage, Rate-of-Turn).

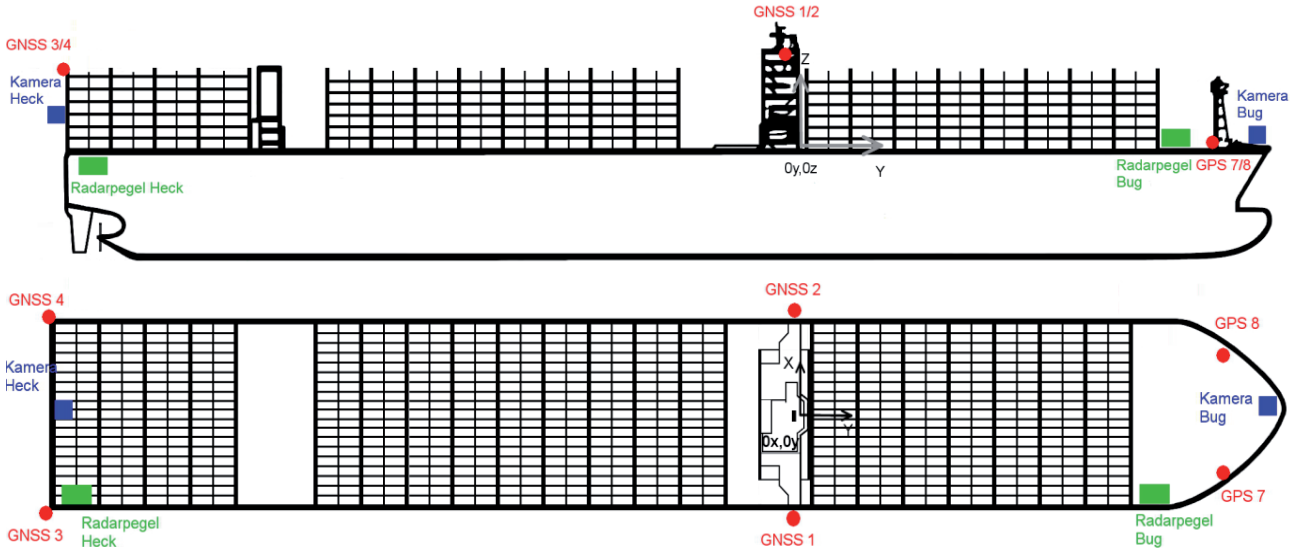


Abbildung 2: Position der Messgeräte auf dem Bemessungsschiff

Über die Höhe der GNSS-Empfänger, den Tiefgang in Ruhelage und den zuvor mithilfe von Pegeldaten berechneten ortsabhängigen Wasserstand wurde der tatsächliche Squat an jeder Position des Bemessungsschiffes auf der Elbe bestimmt. Der Tiefgang in Ruhelage wurde durch zwei Radarpegel vor Fahrtbeginn erfasst (Abbildung 4). Mit diesem ganzheitlichen Ansatz konnte eine Gesamtgenauigkeit der gemessenen Squat von ± 0,10 m oder besser sichergestellt werden.

Abbildung 3: Installation der GNSS-Empfänger auf den Nocken (links) und am Bug (rechts)

Die Wassertiefen entlang der Fahrspur des Bemessungsschiffes wurden aus jeweils aktuellen Datensätzen der Verkehrssicherungspeilungen generiert (Abbildungen 5 und 6). Aus der Wassertiefe, dem Tiefgang in Ruhelage, dem Squat und dem Einfluss der Dichteänderung ergab sich dann die Unterkielfreiheit des Bemessungsschiffes.

Abbildung 4: Installation des Radarpegels an der Reling (hier: am Bug)

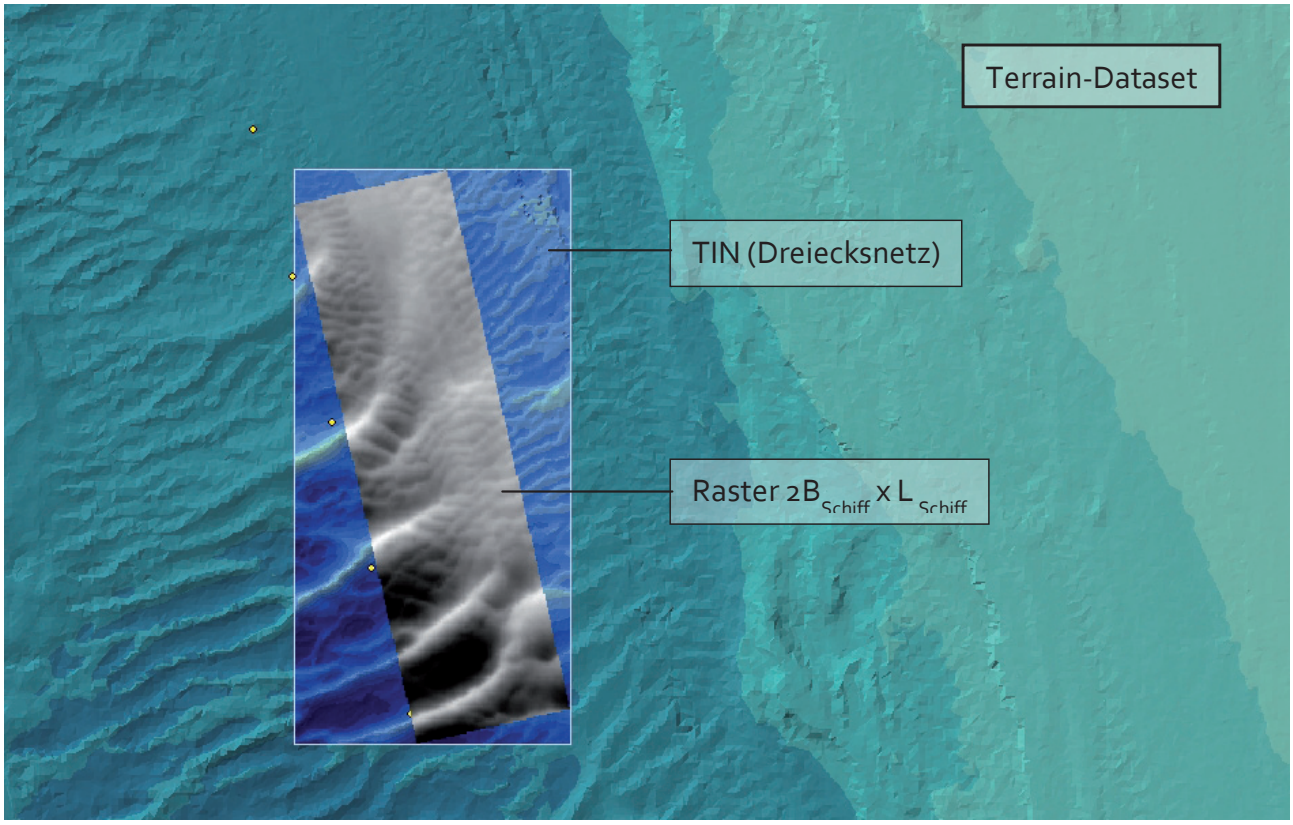


Abbildung 5: Ermittlung des Tiefenrasters für einen Messzeitpunkt

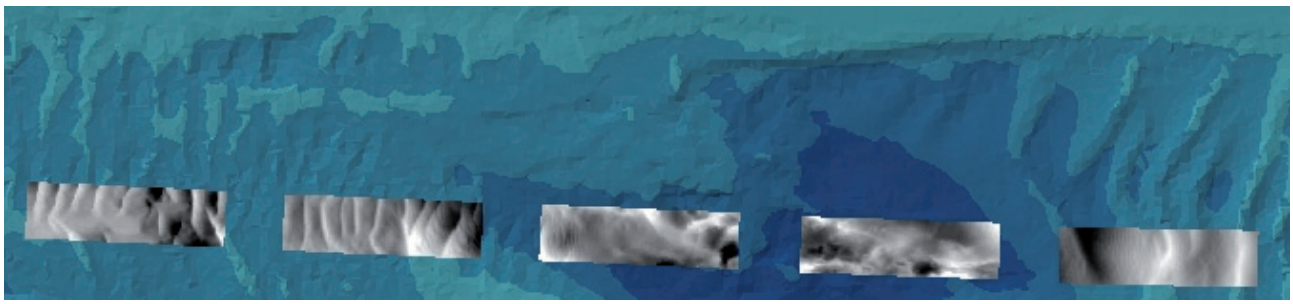


Abbildung 6: Tiefenraster entlang des Kurses

Der Umfang der Messungen, die Anzahl der berücksichtigten Parameter und die erreichte Genauigkeit bilden einen einzigartigen Datensatz zum Squat-Verhalten großer Containerschiffe und Massengutfrachter. Aufgrund der hohen Auflösung und Vollständigkeit wurde ein detaliierter Vergleich zwischen realem, gemessenen und theoretischem Squat, der beispielsweise anhand der ICORELS-Formel berechnet wird, ermöglicht.

Der theoretische Squat nach der ICORELS-Formel (dts) wird in leicht modifizierter Form im Rahmen des Tidefahrplans der Elbe verwendet. Dieser Ansatz unterscheidet sich um einen Vorfaktor von der 1977 von PIANC veröffentlichten Originalformel. Im Tidefahrplan für die Elbe wird anstelle des empirischen Koeffizienten von 2,4 für konventionelle Schiffsformen ein ortsabhängiger ICORELS-Faktor Ic(x) verwendet. Dieser Faktor berücksichtigt nicht nur die Schiffsform, sondern auch gewässerspezifische Faktoren.

$$dts = Ic(x) * \frac{B * TG_{SW}(x) * C_B}{L_{pp}} * \frac{{Fr_h}^2}{\sqrt{1 - {Fr_h}^2}}$$

$$Fr_h = \frac{v_w(x_s)}{\sqrt{g \cdot h(x_s, t)}}$$

Die Froude-Tiefenzahl Frh ergibt sich aus der Geschwindigkeit des Schiffes durch das Wasser vw(xs), und der lokalen Wassertiefe h(xs,t). Das Verdrängungsvolumen des Bemessungsschiffes wird durch die Schiffsbreite B, den ortsabhängigen Tiefgang des Schiffs TGSW(x), die Länge zwischen den Loten LPP und den Blockkoeffizienten des Schiffes CB bestimmt. Der CB-Wert wurde für den mittleren Tiefgang ausgewählt und für die Fahrt auf der Grundlage der Schwankung der Wasserdichte (abgeleitet aus den CTD-Daten) und der sich daraus ergebenden Änderung des Tiefgangs angepasst.

Der gemessene Squat wurde mit berechneten Squat-Werten unter Verwendung der ICORELS-Formel verglichen (Abbildung 7). Die allgemeine Anwendbarkeit dieses Ansatzes, die in einer früheren Feldstudie für die Elbe für kleinere Schiffsklassen verifiziert worden war, wurde auch für die untersuchten größeren Fahrzeuge als angemessen bestätigt. Unter bestimmten Bedingungen unterschätzte die ICORELS-Formel den gemessenen Squat für Containerschiffe mit einer Gesamtlänge von 347 m und größer. Hier konnte eine Abhängigkeit von der Trimmung des Schiffes beobachtet werden. Zusätzlich konnten aus der Analyse neue Erkenntnisse über lokal erhöhten Squat durch begegnende Schiffe abgeleitet werden.

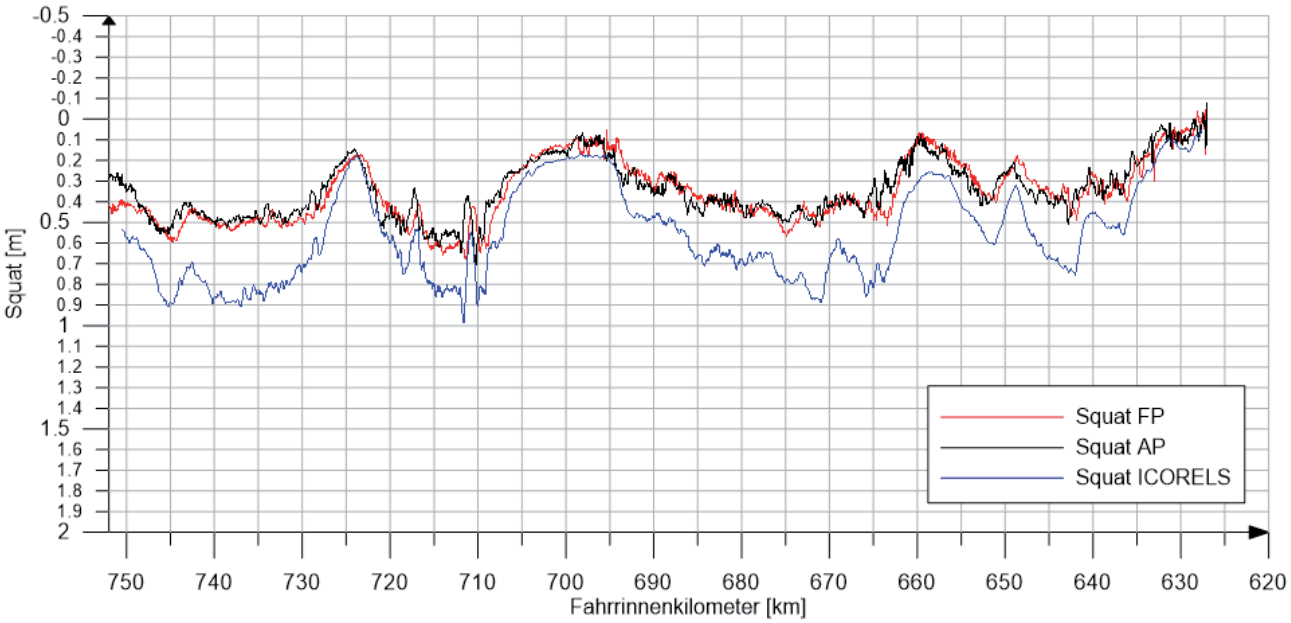


Abbildung 7: Vergleich der gemessenen Squats am vorderen Lot (FP) und am hinteren Lot (AP) und dem theoretischen Squat gemäß ICORELS in der Schiffsklasse C294

Die aufgezeichneten Daten wurden des Weiteren verwendet, um die folgenden Parameter im Detail zu analysieren:

- Korrelation zwischen Geschwindigkeit durch das Wasser und Squat
- Korrelation zwischen TUCK-Parameter und Squat (Abbildung 8)
- Korrelation zwischen Unterkielfreiheit und Squat
- Korrelation zwischen Flussbreite und Squat
- Auswirkung der Schiff-zu-Schiff-Interaktion auf den Squat (Abbildung 9)
- Korrelation zwischen Strömung und Squat
- Korrelation zwischen der Änderung der Wasserdichte und der Änderung der Trimmung
- Auswirkung der Krängung auf den Tiefgang
- Auswirkung der meteorologischen Einflüsse auf die Schiffsdynamik

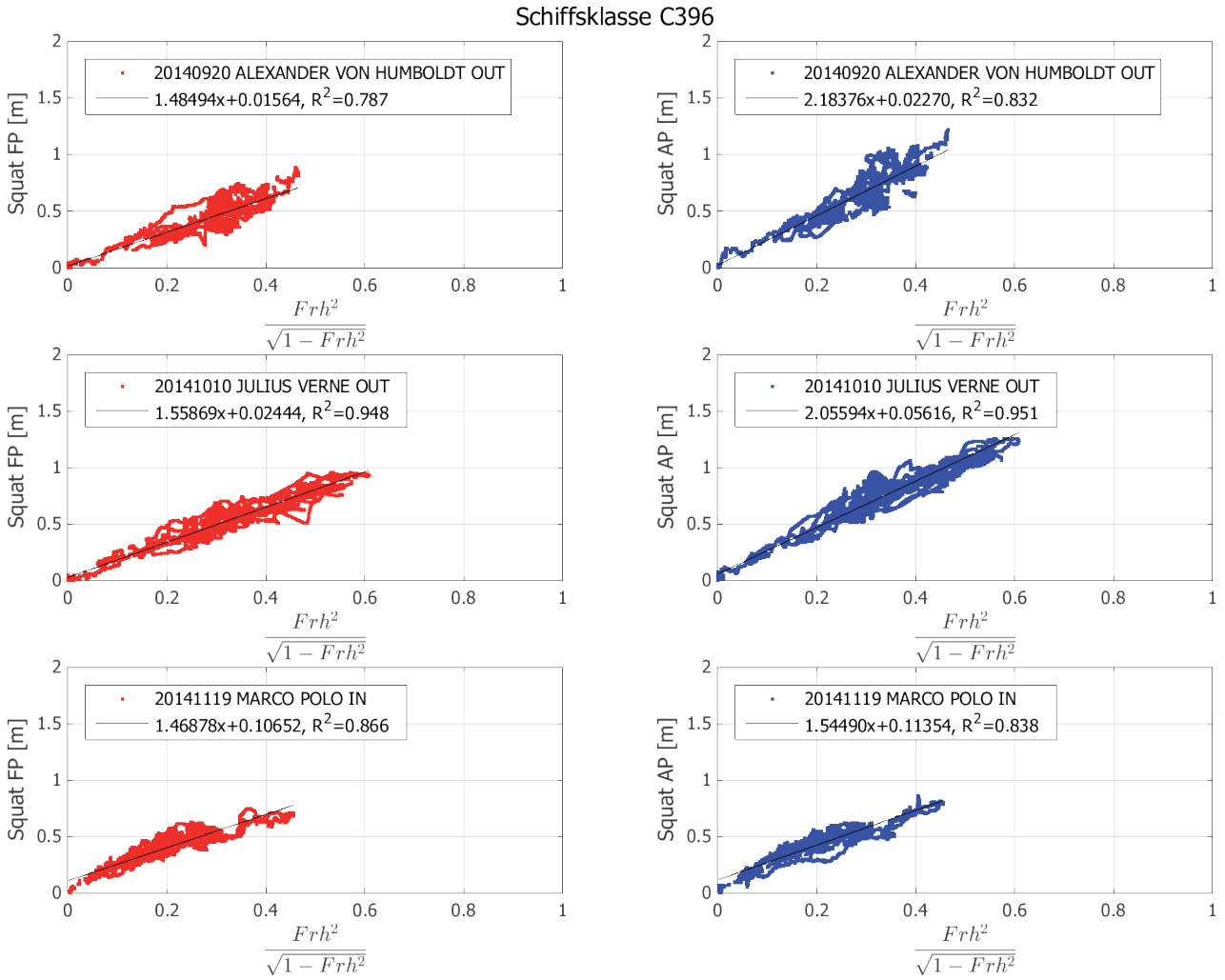


Abbildung 8: Korrelation zwischen Squat FP / AP und TUCK-Parameter für die Schiffsklasse C396

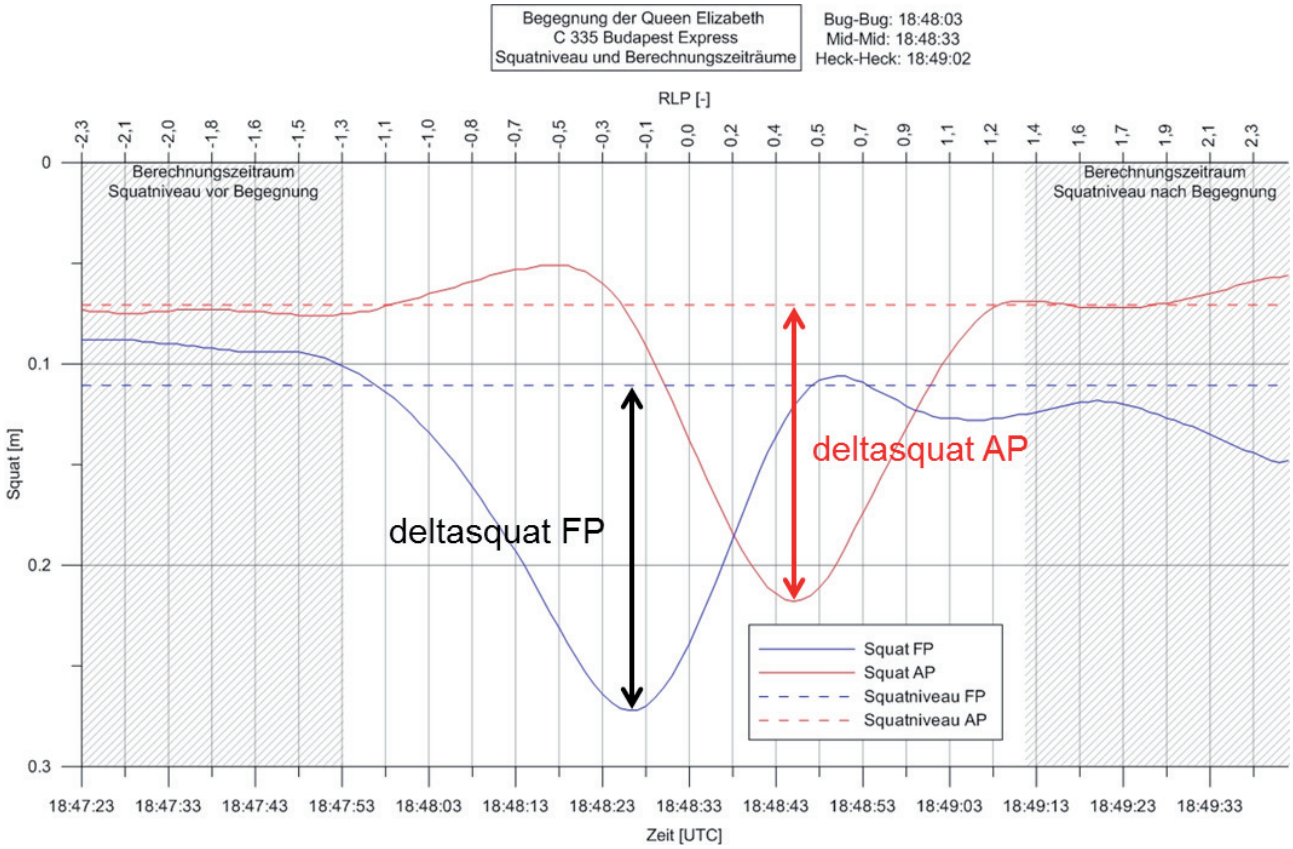


Abbildung 9: Squat-Erhöhung bei Schiff-Schiff-Interaktion

Risikotreibenden Faktoren, ihrer Indikatoren und der daraus resultierenden Entscheidungskriterien: Der interdisziplinäre Ansatz in Deutschland

von A. Panenka[1], J. Sorgatz[2] und J. Kasper[3]

Abstract

Dieser Artikel stellt ein interdisziplinäres Forschungsprogramm im Zusammenhang mit der Zuverlässigkeit von Verkehrsinfrastrukturen vor. Das vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) initiierte Programm zielt darauf ab, die zugrunde liegenden risikotragenden Faktoren, ihre Indikatoren und resultierenden Entscheidungskriterien zu beleuchten. Am Beispiel der Bundeswasserstraßen in Deutschland wird der innovative Ansatz veranschaulicht.

1 BAW: Fachwissen über Wasserstraßen in Deutschland

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) mit ihrer über 100-jährigen wissenschaftlichen Tradition auf dem Gebiet der Wasserbautechnik befasst sich mit einer Vielzahl anspruchsvoller Aufgaben. Vorgängerinstitution des BAW war die Königliche Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, die 1903 in Berlin gegründet wurde.

Der BAW wurde ein technisch-wissenschaftlicher Auftrag übertragen, der alle Bereiche der Wasserstraßentechnik im Zusammenhang mit den Bundeswasserstraßen abdeckt. Der BAW wurde auch die Verantwortung für den Bau von Spezialschiffen für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) übertragen. Darüber hinaus übernimmt das BAW die Bauplanung von Spezialschiffen für andere zivile Bundesbehörden. Heute ist die BAW von ihrem Hauptsitz in Karlsruhe und ihren Büros in Hamburg aus tätig.

1 Abteilung Bautechnik, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), andreas.panenka@baw.de
2 Abteilung Geotechnik, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), julia.sorgatz@baw.de
3 Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), julia.kasper@baw.de

2 Das BMVI-Expertennetzwerk: Ein interdisziplinärer Ansatz

2.1 Hintergrund

In Deutschland haben die Infrastrukturanlagen einen Investitionswert von rund 430 Milliarden Euro. Die Berücksichtigung der Transportleistung macht den Mehrwert eindrucksvoll deutlich. Neben dem Personenverkehr spielt der Güterverkehr mit seinen rund 655 Milliarden Tonnenkilometern eine zentrale Rolle. Um die Verkehrsleistung zu sichern, sind Investitionen dringend erforderlich. Angesichts der Notwendigkeit, ein belastbares und umweltfreundliches Verkehrssystem in Deutschland zu konzipieren und aufzubauen, geht das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) innovative Wege. Im BMVI-Expertennetzwerk (ExpNW) bündelt sie die Erfahrungen und Kompetenzen ihrer Ressortforschungseinrichtungen und Exekutivagenturen unter dem Leitbild "Wissen - Können - Handeln". Das im Januar 2016 gegründete Netzwerk ist ein neues Format der Ressortforschung, das sich aus sieben Ressortforschungseinrichtungen und Exekutivagenturen des BMVI zusammensetzt (vgl. BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR 2017).

Die kooperierenden Institutionen sind:

- Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)
- Bundesanstalt für Wasserbau und Gewässerforschung (BAW)
- Deutscher Wetterdienst (DWD)
- Bundesamt für Güterverkehr (BAG)
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)
- Eisenbahn-Bundesamt (EBA)

2.2 Aufbau des ExpNW

Das ExpNW umfasst fünf unterschiedliche Themenfelder (siehe Abbildung 1). Jeder dieser Bereiche ist in mehrere Schwerpunktthemen (SPT) unterteilt, die sich mit bestimmten Interessengebieten befassen. Auf administrativer Ebene stellt der Lenkungsausschuss die direkte Verbindung zur Leitungsebene von Regierungs- und Ressortbehörden sowie Verwaltungen her. Unterstützt vom wissenschaftlichen Arbeitsstab sorgt die Gesamtkoordination für eine reibungslose Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Parteien, indem er die Verwaltungs- und Organisationsarbeit leitet.

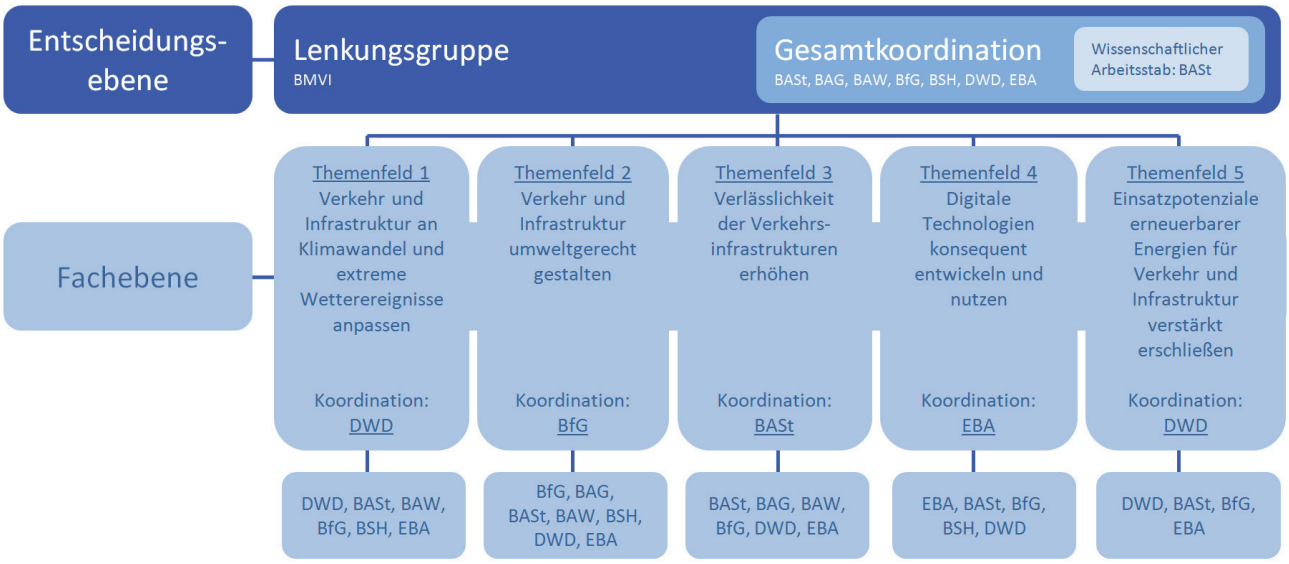


Abbildung 1: Das BMVI-Expertennetzwerk Wissen-Können-Handeln

2.3 Die BAW als Teil des interdisziplinären Ansatzes

Als technischer Berater des BMVI ist die BAW Teil des ExpNW. Die Forschungsaktivitäten des BAW berücksichtigen die besonderen Anforderungen an die Wasserstraßeninfrastruktur. Das ExpNW finanziert derzeit 10 FuE-Projekte und 12 Forschungsstellen der BAW. Jedes der Projekte ist einem spezifischen Forschungsgebiet zugeordnet, das bestimmte Aspekte zum Verständnisses der risikotreibenden Faktoren, ihrer Indikatoren und der daraus resultierenden Entscheidungskriterien im Zusammenhang mit Ingenieurbauwerken abdeckt.

Themenfeld 1: Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen

Innerhalb des Themenfelds 1 werden die durch Klimaveränderungen und extreme Wetterereignisse bedingten Verwundbarkeiten für Verkehr und Infrastruktur bestimmt und darauf aufbauend entsprechende Anpassungsoptionen entwickelt. Hierbei ist die Resilienz gegenüber extremen Wetterereignissen und den Folgen des Klimawandels sowie eine nachhaltige Nutzbarkeit der Verkehrsinfrastruktur von besonderer Bedeutung. Durch die Vernetzung des Expertenwissens von DWD, BSH, BfG, BAW, EBA und BASt werden die jeweiligen spezifischen Kenntnisse zur Klimaentwicklung mit praxisbezogenem Wissen zu den drei Verkehrsträgern Straße, Schiene und Wasserstraße zusammengeführt.

Das Themenfeld 1 gliedert sich in neun Schwerpunktthemen, die sich mit der Bereitstellung von Daten bzw. mit konkreten Gefährdungen beschäftigt. Hierzu zählen Hochwasser, Sturm, Hangrutschungen und wasserstraßenspezifische Gefährdungen. Die Ergebnisse gehen in ein Risikomanagementsystem ein, welches ebenfalls weiterentwickelt wird. Hinsichtlich der projizierten Auswirkungen des Klimawandels werden Anpassungsoptionen entwickelt und getestet, sowohl für einzelne Verkehrsträger als auch verkehrsträgerübergreifend. In zwei Fokusregionen Küste und Binnen werden die Simulationsmodelle und Analysemethoden angewendet und validiert.

Die BAW ist in allen Schwerpunkten vertreten und trägt ihre Erfahrung sowie die im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse insbesondere aus Analysen numerischer Modelluntersuchungen bei.

Themenfeld 2: Verkehr und Infrastruktur umweltgerecht gestalten

Das Themenfeld 2 hat das Ziel den Verkehr und die Infrastruktur nachhaltig und umweltgerecht zu entwickeln. Dieses Ziel wird aufgeteilt in 5 Schwerpunkten verfolgt, die sich der Biodiversität und Strukturvielfalt an den Verkehrswegen, dem Problem von invasiven Arten (Neobiota), die durch den Verkehrsträger eingeschleppt und verbreitet werden, den verkehrsbedingten stofflichen Belastungen, den bau- und bauwerksbedingten Emissionen und Immissionen und der Minderung der Geräusch- und Lärmemissionen widmen. Die BAW ist mit einem Projekt im Schwerpunkt 203 beteiligt, in dem betriebliche und technische Optimierungen in der Binnenschifffahrt zur Verminderung von Emissionen erarbeitet werden. Hierzu wird das fahrdynamische Modell FaRAO zur Simulation von Binnenschiffen eingesetzt und um ein spezielles Motorenmodell erweitert, das auch die Emissionen eines Binnenschiffs bei unterschiedlichen Betriebs-

punkten des Motors nachbilden kann. Zur Kalibrierung und Validierung des Motorenmodells sollen Schiffs- und Motordaten messtechnisch unter realen Betriebsbedingungen erhoben werden. Die mit FaRAO berechneten Emissionen sollen zuletzt auf den Schiffsverkehr in einer Pilotstrecke im Bereich des Duisburger Hafens hochgerechnet werden. Im Schwerpunkt 203 soll in einem letzten Schritt die Ausbreitung der Emissionen aller Verkehrsträger mithilfe eines Luftschadstoff-Transportmodells mit chemischen Reaktionsgleichungen modelliert werden.

Themenfeld 3: Verlässlichkeit der Verkehrsinfrastruktur erhöhen

Die Zuverlässigkeit der Infrastrukturen wird als wesentlicher Bestandteil eines robusten Verkehrssystems angesehen. Der Großteil des deutschen Verkehrsnetzes besteht aus Bauwerken, die vor mehreren Jahrzehnten errichtet wurden und die einer kontinuierlichen Wartung und Modernisierung bedürfen. Eine Kombination aus alternder Infrastruktur, veränderter bzw. allgemein höherer Verkehrsbelastungen sowie Umweltstressoren erhöhen die Risiken, die von den Bauwerken ausgehen. In diesem Zusammenhang waren die bisherigen Anstrengungen zur Instandhaltung der Bauwerke bei weitem nicht ausreichend und führten zu einem erheblichen Investitionsstau.

Deshalb untersucht Themenfeld 3 Methoden und Konzepte, die dazu beitragen können, die Zuverlässigkeit der Verkehrsinfrastruktur wieder zu erhöhen. Zuverlässigkeit ist definiert als "die Fähigkeit einer Struktur oder eines Bauteils, die spezifizierten Anforderungen zu erfüllen, einschließlich der Lebensdauer, für die sie ausgelegt ist." (DIN EN 1990:2010) Diese Definition impliziert, dass funktionale Anforderungen (d.h. Grenzzustände), strukturelles Verhalten, aktuelle und zukünftige Verkehrslastszenarien sowie mögliche Schädigungsprozesse über die gesamte Lebensdauer des Bauwerks allgemein bekannt und messbar sind sowie bewertet werden können. In der Folge muss ein effektives Instandhaltungsmanagement auch unvermeidbare Unsicherheiten berücksichtigen, die mit diesen Aspekten verbunden sind.

Themenfeld 3 besteht aus vier Schwerpunktthemen (siehe Abbildung 2 und Kap. 3):

- modernste Feldtestmethoden zur Beurteilung des Zustands der Infrastruktur nach neuestem Stand der Technik
- qualitative und quantitative Werkzeuge zur Bewertung der Zuverlässigkeit von Bauwerken.
- Verfügbarkeit und Anfälligkeit der Infrastruktur bei extremen Wetterereignissen
- Bauen unter Betrieb

Insgesamt zielen diese Schwerpunktthema auf die Entwicklung eines proaktiven und zukunftsorientierten Instandhaltungsmanagementsystems ab, das dazu beiträgt, die Zuverlässigkeit der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland zu erhöhen (siehe PANENKA et. al 2018).

Themenfeld 4: Digitale Technologien konsequent entwickeln und nutzen

Ziel des Themenfeldes 4 ist es, durch eine Vernetzung der Ressortforschung und Fachbehörden des BMVI die digitalen Technologien positiv zu beeinflussen. Der thematische Schwerpunkt liegt somit in der konsequenten Nutzung der Möglichkeiten der Informations- und Kommunikationstechnologien mit einem Fokus auf die interbehördliche Zusammenarbeit im Bereich der Informationsbereitstellung und IT Nutzung. Das Themenfeld befindet sich derzeit noch in einer Konzeptionsphase, die von der BAW im Beobachterstatus begleitet wird.

Themenfeld 5: Einsatzpotentiale Erneuerbarer Energien für Verkehr und Infrastruktur verstärkt erschließen

Im Themenfeld 5 werden die verschiedenen Einsatz- und Gewinnungspotentiale erneuerbarer Energien in einem intermodalen Ansatz für Verkehr und Infrastruktur erschlossen. Ein verkehrsträgerübergreifendes Pilotprojekt zu dieser Thematik wird mit Beteiligung von DWD, BfG, BASt und EBA zunächst den Nutzen der gemeinsamen Forschung in diesem Themenfeld aufzeigen. Die beteiligten Oberbehörden arbeiten zusammen, um Konzepte für eine deutlich verstärkte Nutzung von erneuerbaren Energien in der Verkehrsinfrastruktur und beim Betrieb von Wartungs- und Instandhaltungsfahrzeugen zu erstellen. Optionen und Empfehlungen werden entwickelt, damit die Verkehrsträger Wasserstraße, Schiene und Straße in Zukunft verstärkt ihren Beitrag zum Klimaschutz leisten können. BAW und BAG werden das Themenfeld weiter begleiten.

3 Verlässlichkeit der Verkehrsinfrastruktur erhöhen

Die Infrastruktur der Wasserstraßen weist eine große Anzahl von sehr unterschiedlichen Bauwerken auf. Die Reduzierung der aus diesen Strukturen resultierenden Risiken erfordert daher fundierte technische Kenntnisse und adäquate Bewertungsinstrumente. Für eine effiziente Risikobewertung sind aussagekräftige Indikatoren für die Tragfähigkeit

in Kombination mit zusätzlichen Datenquellen wie Geographische Informationssysteme (GIS) oder präzise Wettermodelle unerlässlich. Die Kombination aller Informationen ermöglicht ein Verständnis über die risikotreibenden Faktoren. Dies hilft dann bei der Definition von wesentlichen Kriterien, anhand derer über notwendige Instandsetzungsmaßnahmen entschieden werden kann. Dieses Wissen steigert die Nachfrage nach neuen Technologien und Methoden, die dazu beitragen können, sowohl die tatsächlichen Auswirkungen disruptiver meteorologischer Ereignisse auf die Infrastruktur als auch die potenziellen Risiken möglicher Ausfallszenarien zu reduzieren.

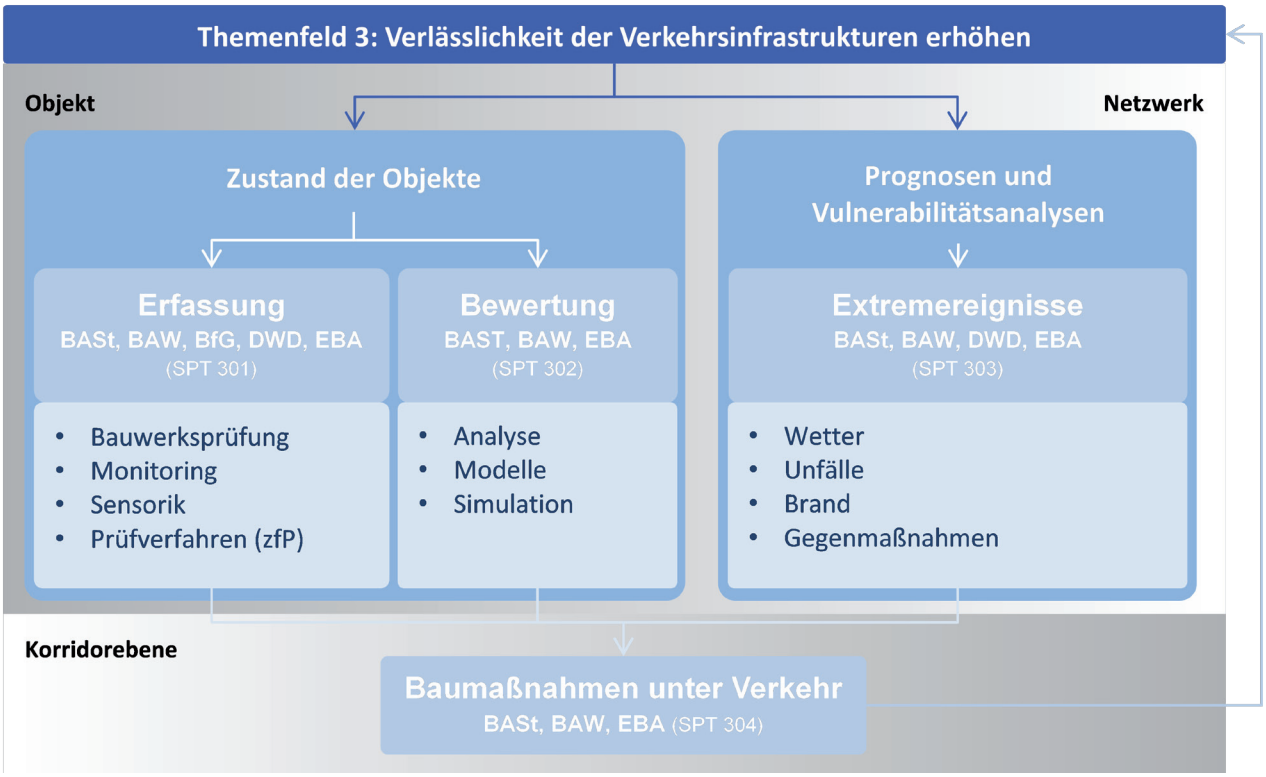


Abbildung 2: Organigramm von Themenfeld 3

In diesem Zusammenhang zeigen die interdisziplinären Forschungsaktivitäten von Themenfeld 3 (siehe Abbildung 2) im ExpNW erste Ergebnisse, die insbesondere die Notwendigkeit einer Verbesserung der Zuverlässigkeit von Wasserstraßeninfrastrukturen verdeutlichen.

3.1 Reduzierung der Auswirkungen disruptiver Ereignisse durch eine vorausschauende Wasserstandsregelung

Der Wasserstand an deutschen Wasserstraßen unterliegt oft einer genau vorgeschriebenen Wasserstandsregelung. Störende Ereignisse für die automatisierte Wasserstandsregelung dieser staugeregelten Wasserstraßen werden oft durch seitliche Zuflüsse verursacht, deren Abflussmenge unbekannt ist (z.B. Regenwasserüberläufe aus städtischen Gebieten nach Starkregenereignissen). Um Überschreitungen der Wasserstandstoleranz zu vermeiden und Abflussschwankungen zu reduzieren, entwickelt die BAW eine neue Regelungsstrategie. Eine intelligente Wasserstandsregelung sollte auf einem Modell des aufgestauten Flussabschnitts, hochauflösenden Niederschlagsvorhersagen für städtische Einzugsgebiete und der Kommunikation zwischen benachbarten Stauhaltungen basieren (KASPER, J. et al. 2017). Der Entwicklungsprozess dieses vorausschauenden Regelungskonzepts zeigt die Vorteile einer engen Zusammenarbeit zwischen Institutionen mit Kompetenzen in Meteorologie, Wasserbau und Regelungstechnik.

Wesentliche Risikofaktoren sind die Vorhersagegenauigkeit von Extremniederschlägen und damit der präzise Steuerungsanteil der resultierenden Abflüsse. Je höher die Differenz ist zwischen sommerlichem Niedrigwasserabfluss und der Entlastung nach einem Starkregenereignis, desto höher ist die Belastung der Wasserstandsregelung. Der wichtigste Indikator für eine gut funktionierende Regelung ist das Ausmaß der Wasserstands- und Abflussschwankungen an den Wasserstraßen.

Abbildung 3 zeigt eine schematische Darstellung der vorausschauenden Wasserstandsregelung. Ein Niederschlags-Abflussmodell schätzt den zukünftigen Seitenzufluss anhand einer wahrschein-

lichkeitsbasierten Wettervorhersage des DWD. Basierend auf diesen Vorhersagen und der Informationen über die oberwasserseitige Stauhaltung berechnet das von AMANN et al. (2000) entwickelte modellhafte prädiktive Steuerungssystem mit Hilfe von Optimierungsverfahren den idealen Wasserstand und die Abflusstrajektorien. Auf diese Weise werden Schwankungen im Abfluss homogenisiert, was die Zuverlässigkeit der betroffenen Verkehrsinfrastruktur und damit die Sicherheit der Schifffahrt erhöht. Für die Staustufe Hofen am Neckar wird ein Pilotprojekt durchgeführt. Die Wahl fiel auf diese Staustufe, weil der seitliche Zufluss aufgrund von extremen Niederschlagsereignissen in der Sommersaison deutlich größer sein kann als der Abfluss der Wasserstraße.

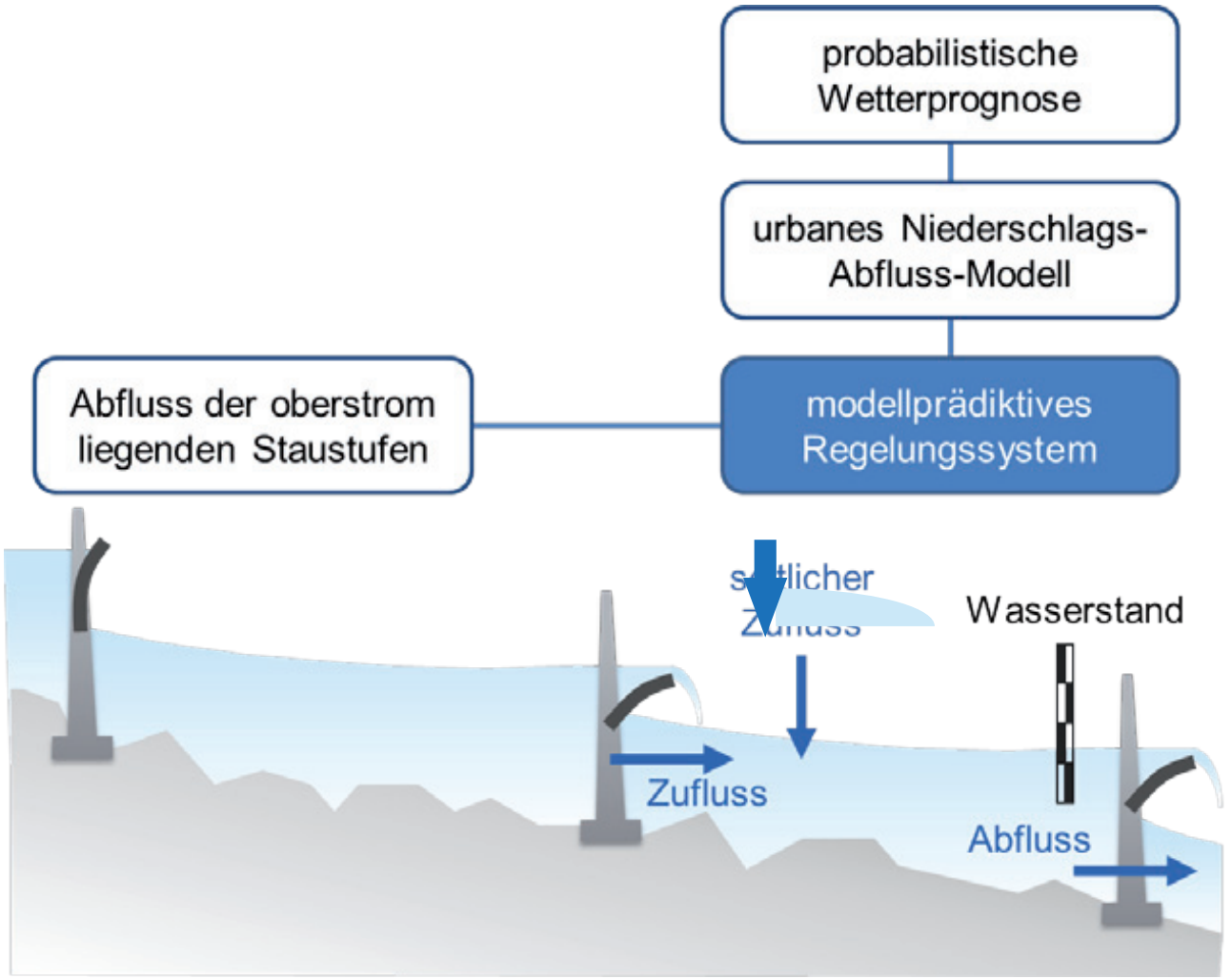


Abbildung 3: Schematische Darstellung der vorausschauenden Wasserstandsregelung

Die Beurteilung von Alterungsprozessen und Schadensentwicklung ist ein wesentlicher Bestandteil einer Zuverlässigkeitsanalyse. Beide sind jedoch abhängig von stark variierenden Anfangs- und Randbedingungen am jeweiligen Bauwerk. Daher ist eine Erhebung und Nutzung des vorhandenen Expertenwissens unerlässlich. Sogenannte Leitfadeninterviews (z.B. BOGNER, A. et al. 2009; MILES, M. B. et al. 2014) wurden zur Planung eines großmaßstäblichen Modellversuchs einer Uferböschung eingesetzt. Die Interviews wurden durchgeführt, um die langfristige Schadensentwicklung von Schüttsteindeckwerken und deren Ursachen zu analysieren (SORGATZ, J. 2018). Basierend auf den Ergebnissen der Expertenbefragungen wurde der Modellversuch konzipiert (siehe Abbildung 4) und das Modell in einem Wellenbecken der BAW errichtet. In verschiedenen Versuchsreihen konnte schließlich der durch hydraulische Belastungen hervorgerufene Verlauf einer Deckwerkschädigung nach einem Initialschaden beobachtet werden. Ergänzt wird die Arbeit durch Berechnungen mit modernen Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse unter Verwendung analytischer und numerischer Berechnungsmodelle (z.B. BAECHER, G.B. & CHRISTIAN, J.T. 2003) sowie durch LangzeitNaturmessungen. Zur Überwachung von Steinverlagerungen werden ein Laserscanner und die Structure-from-Motion-Technik (SfM), eingesetzt.

Das Forschungsvorhaben nutzt sowohl moderne ingenieurwissenschaftliche Ansätze als auch etablierte Methoden der Sozialwissenschaften. Der interdisziplinäre Ansatz des Projekts stieß innerhalb des ExpNW auf großes Interesse. Darüber hinaus ist es ein hervorragendes Beispiel dafür, wie verschiedene Datenquellen und Expertenwissen kombiniert werden können, um fundiertes technisches Wissen zu erwerben, das schließlich zu einer fundierten ingenieurtechnischen Lösung führt.

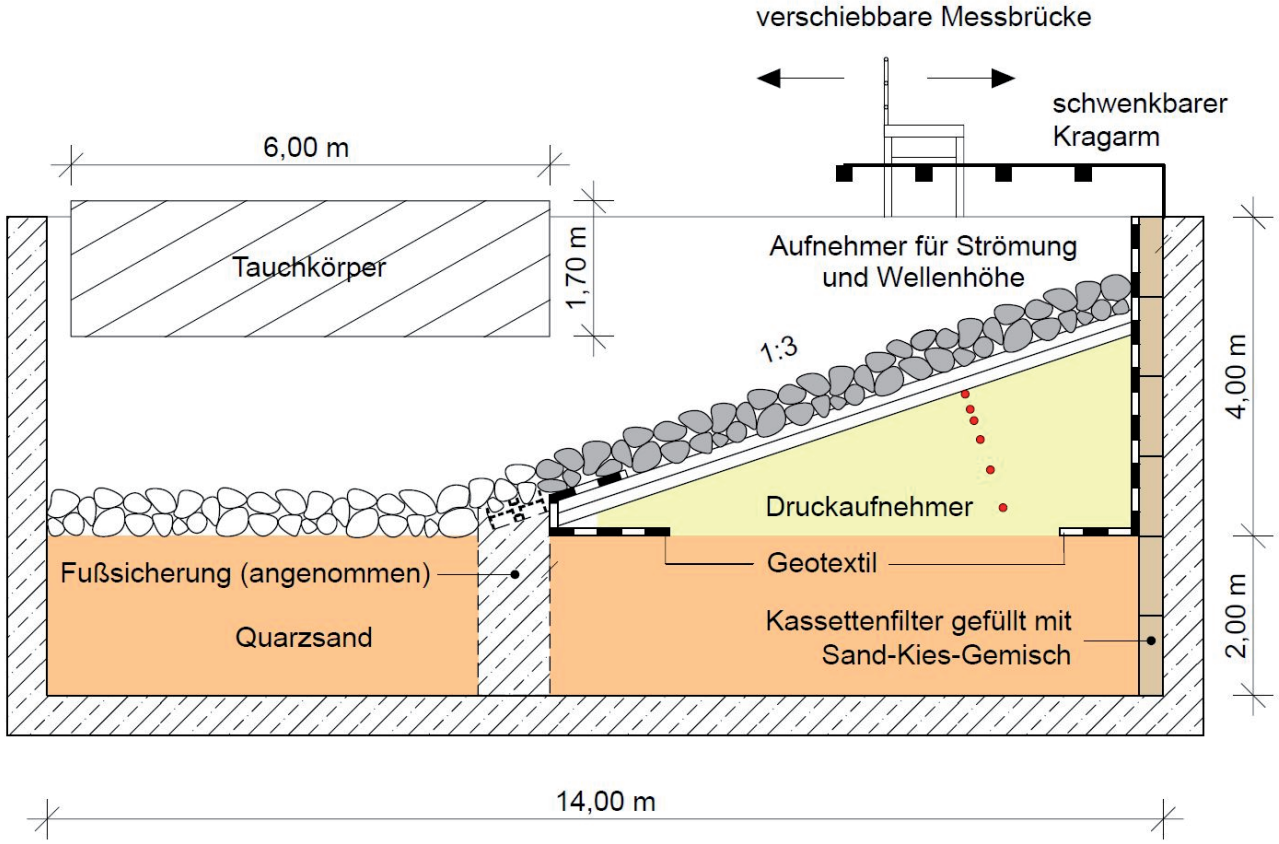


Abbildung 4: Aufbau des Modellversuchs im Wellenbecken der BAW

3.2 Risikoabschätzung bei Ingenieurbauwerken basierend auf deren Zustand

Die detaillierte, d.h. quantitative, Beurteilung der Zuverlässigkeit von Bauwerken ist eine komplexe Aufgabe. Soll eine große Anzahl von Bauwerken bewertet werden, stellt sich daher die Frage nach der Machbarkeit. Im Maschinenbau werden häufig qualitative Methoden eingesetzt, um die Zuverlässigkeit von Prozessen und Produkten zu beurteilen. Diese Methoden sind für Bauingenieure weitgehend unbekannt, erweisen sich aber bei der Analyse von Daten aus Bauwerksinspektionen und Expertenwissen als vorteilhaft. Dafür wurde die weit verbreitete Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) angepasst, um die bereits im Instandhaltungsmanagementsystem der WSV verfügbaren Daten zu nutzen (siehe Abbildung 5). Die FMEA ist eine systematische und induktive Methode. Die Grundidee ist es, mögliche Ausfallmodi eines Systems, eines Systemkomponente oder einer Produktkomponente zu finden und zu bewerten. Ebenso werden mögliche Fehlerfolgen und Fehlerursachen identifiziert. Am Ende des Verfahrens stehen eine Risikobewertung und die Festlegung von Optimierungsmaßnahmen. Ziel der Methode ist es, Risiken und Schwachstellen so früh wie möglich zu erkennen, um Verbesserungen frühzeitig umzusetzen (BERTSCHE, B. & LECHNER, G. 2004). Darüber hinaus ermöglicht die Methode die Berücksichtigung sowohl qualitativer als auch quantitativer Daten. Die Risikobewertung führt zu einem Ranking der identifizierten Fehlermodi und unterstützt die Priorisierung von Optimierungsmaßnahmen für die effektivste Verbesserung der Ist-Situation.

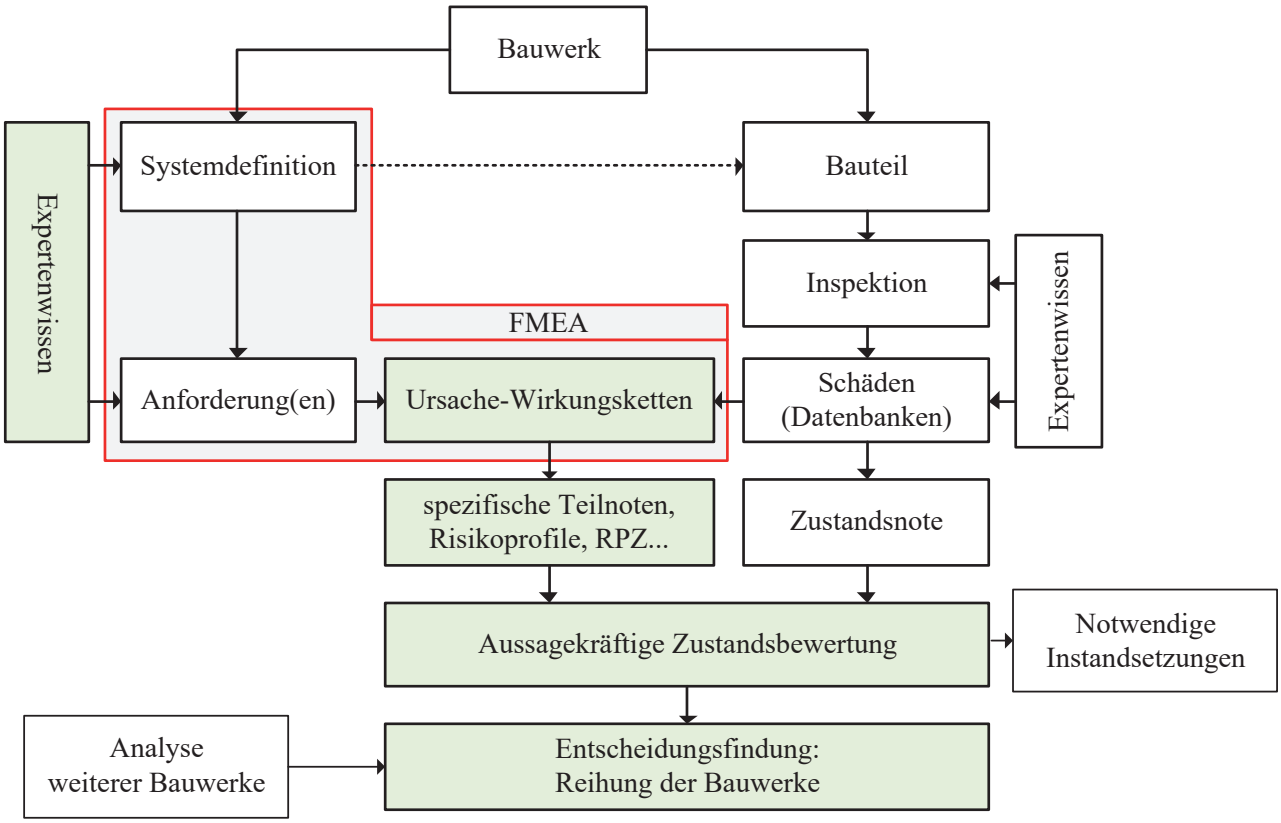


Abbildung 5: FEMA als Teil der Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken

Die klassische FMEA wurde im Rahmen der Forschungsarbeiten um eine auf Fuzzy Logik basiertes Bewertungsmethode erweitert, die umfassende Kennzahlen für eine vergleichende Risikobewertung für eine Vielzahl von Strukturen liefert (PANENKA, A. & NYOBEU F., 2018a). In einem zweiten Schritt können darauf aufbauend verschiedene Strukturen verglichen werden (PANENKA, A. & NYOBEU F., 2018b). Dazu werden die Ergebnisse in einem sogenannten Risikoprofil des Bauwerks zusammengefasst (siehe Abbildung 6). Je höher das Risikoprofil, desto risikobehafteter ist der Zustand der Struktur. Diese qualitative Risikobewertung hilft dann im Entscheidungsprozess über weitere Maßnahmen wie z.B. die Intensivierung von Sanierungsmaßnahmen oder die Installation einer intelligenten Wasserstandsregulierung, um die Belastung durch Schwankungen des Wasserstands zu reduzieren.

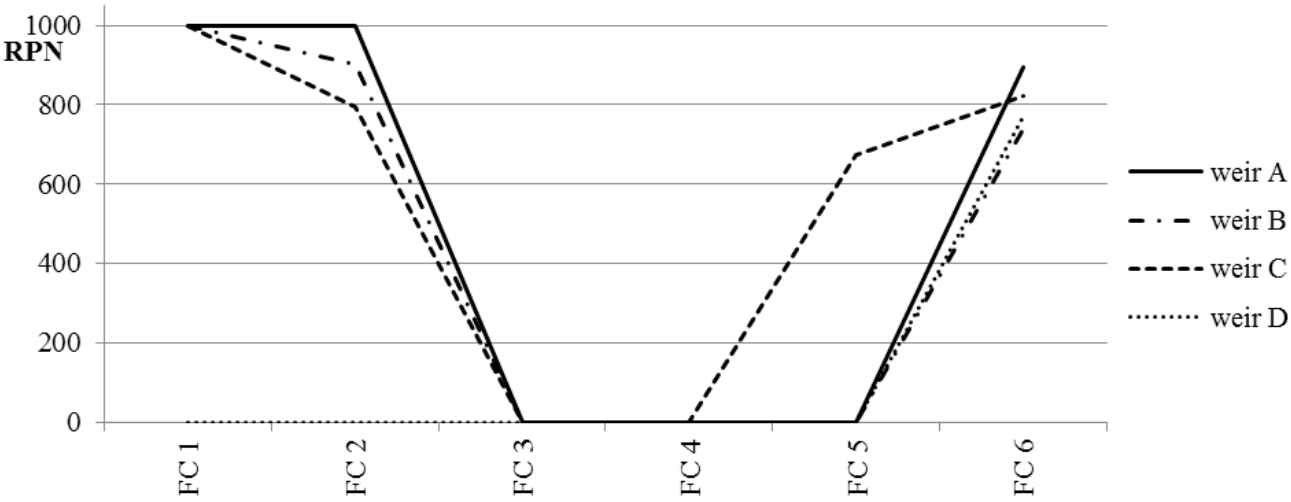


Abbildung 6: Risikoprofile von 4 Wehrbauwerken anhand 6 unterschiedlicher Fehlerursachen

4 Zusammenfassung

Die vorgestellten Projekte zeigen den Nutzen interdisziplinärer Forschungsansätze im Hinblick auf das Verständnis der risikotreibenden Faktoren, ihrer Indikatoren und der daraus resultierenden Entscheidungskriterien. Die bisher erzielten Ergebnisse ergänzen die laufende Diskussion über effiziente Investitionsstrategien zur Reduktion der Risiken, die mit einer alternden Infrastruktur einhergehen. Auf diese Weise tragen die Forschungsaktivitäten der BAW dazu bei, den dringend erforderlichen Abbau des Instandhaltungsrückstandes und damit eine zuverlässige, hochverfügbare Infrastruktur zu erreichen.

Das ExpNW ist ein zukunftsweisender Ansatz zur Bündelung der Stärken von Forschungseinrichtungen und Behörden. Begleitet werden die Forschungsarbeiten von zukunftsorientierten Roadmaps für die einzelnen Themen und einem umfassenden Strategieplan. Auf der technischen Ebene werden Kontakte geknüpft und eine gemeinsame methodische und technologische Wissensbasis aufgebaut. Auf der Entscheidungsebene werden die notwendigen Organisationsstrukturen und -prozesse entwickelt und an die Bedürfnisse der an den Projekten beteiligten Experten angepasst. Bereits in dieser frühen Phase des ExpNW wurden mehrere Hürden in der Zusammenarbeit über Behördengrenzen hinweg überwunden. Erste Veröffentlichungen auf nationaler und internationaler Ebene sind in Vorbereitung oder werden in Kürze veröffentlicht. In den Jahren 2018 und 2019 werden verstärkt wissenschaftliche und politische Veranstaltungen durchgeführt, um die Vorteile des BMVI-Expertennetzwerks an die Betreiber von Verkehrsinfrastrukturen und an politische Entscheidungsträger zu kommunizieren.

Die Projekte werden fortlaufend auf www.bmvi-expertennetzwerk.de. präsentiert.

Danksagung

Die in diesem Artikel beschriebenen Forschungsarbeiten werden durch das BMVI-Expertennetzwerk, ein vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) initiiertes multidisziplinäres Forschungsprogramm, finanziert und unterstützt.

Literaturverzeichnis

Amann, K.-U., Arnold, E. & Sawodny, O. (2016): Online realtime scheduled model predictive feedforward control for impounded river reaches applied to the Moselle river. In: 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE): 1276–1281. IEEE, Fort Worth, Texas, USA, 21 – 24 August 2016.

Baecher, G. B. & Christian, J. T. (2003). Reliability and statistics in geotechnical engineering. Wiley, Chichester

Bertsche, B. & Lechner, G. (2004). Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten. Berlin, Springer Verlag, Heidelberg

Bogner, A. et al (Eds.) (2009). Interviewing Experts. Palgrave Macmillan, Basingstoke

DIN EN 1990:2010. Eurocode - Basis of structural design. Beuth, Berlin

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017). BMVI-Expertennetzwerk: Wissen-Können-Handeln. BMVI, Berlin, online verfügbar: http://www.bmvi-expertennetzwerk.de/DE/Publikationen/Medien/Brochure-Expertennetzwerk.pdf

Kasper, J., Simons, F., Belzner, F. & Schmitt-Heiderich, P. (2017): Einfluss von Starkregenereignissen auf die Abfluss- und Stauregelung am Beispiel der Neckarstauhaltung Hofen. In: Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Veranstaltungen 5/2017, Koblenz, Germany, 13 – 14 September 2016

Miles, M. B. et al. (2014): Qualitative data analysis. A methods sourcebook (3. ed.), Sage Publ, Los Angeles, Calif.

Panenka, A. et al. (2018). Reliability assessment of infrastructure in Germany: Approaching a holistic concept. In Caspeele, R. et al. (ed.): 6th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2018). Proc. intern. symp, Ghent, 28 – 31 October 2018; not yet published.

Panenka, A. & Nyobeu, F. (2018a). Maintaining an aging infrastructure based on a fuzzy risk assessment methodology. In Qian, X. D. et al. (ed.): 6th International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management. Proc. intern. symp, Singapore, 31 may – 1 June 2018; not yet published

Panenka, A. & Nyobeu, F. (2018b). Condition assessment based on results of qualitative risk analyses. In Caspeele, R. et al. (ed.): 6th International Symposium on Life-Cycle Civil Enginee-

ring (IALCCE 2018). Proc. intern. symp, Ghent, 28 – 31 October 2018; not yet published

Schmidt-Bäumler, H. (2017). Risk-based maintenance management system for waterway infrastructures in Germany. In Bakker, J. et al. (ed.) Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure: 559-566. London: Taylor & Francis Group

Sorgatz, J. & Kayser, J. & Schüttrumpf, H. (2018): Expert interviews in long-term damage analysis. In Caspeele, R. et al. (ed.): 6th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Ghent, 28 – 31 October 2018; not yet published

Sorgatz, J. & Leismann, K. (2018): Damage assessment of bank revetments using SfM and 3D laser scanning. In Qian, X. D. et al. (ed.): 6th International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management. Proc. Intern. Symp, Singapore, 31 May – 1 June 2018; not yet published

Stamatis, D.H. (2003). Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution. ASQ Press, Milwaukee

Westoby, M. J. et al. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry. A low-cost, effective tool for geoscience applications. In: Geomorphology 179: 300–314

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

von François Nyobeu[1] und Andreas Panenka[2]

Zusammenfassung

Der Bauwerksbestand der Bundeswasserstraßen ist Alterungsprozessen und verschiedenen Schädigungsmechanismen ausgesetzt, die sich auf die strukturelle Zuverlässigkeit auswirken. Vor diesem Hintergrund gewinnen strategische Entscheidungen zur Bestimmung der Notwendigkeit von Instandsetzungsmaßnahmen zunehmend an Bedeutung. Im vorliegenden Beitrag werden verschiedene Fehlerursachen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die strukturelle Zuverlässigkeit von Verkehrswasserbauwerken untersucht. Darüber hinaus wird eine Methode zur Gewichtung von Prioritäten vorgestellt, mit der verschiedene Fehlerursachen entsprechend dem mit ihnen verbundenen Risiko eines Bauwerkversagens in einer Rangfolge abgebildet werden können. Die Ergebnisse aus einer früheren qualitativen sowie quantitativen Analyse des sich abzeichnenden Risikos eines Bauwerksausfalls mittels der Fehlermöglichkeits-und -Einflussanalyse (FMEA) werden in ein Verfahren zur multikriteriellen Entscheidungsfindung (Multi-Criteria Decision Making, MCDM) eingebracht, das nicht nur die Ungenauigkeit und Subjektivität des Expertenwissens in die Bewertung einbezieht, sondern auch die Unsicherheiten der verfügbaren Schadensdaten. In einer früheren Studie wurden mithilfe der Fehlermöglichkeits- und -Einflussanalyse (FMEA) die Kriterien Bedeutung (B) der Fehlerfolge, Auftretenswahrscheinlichkeit (A) des Fehlers und Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) der Fehlerursache als vorrangige Kriterien für die Beurteilung des Risikos eines Bauwerksausfalls ausgemacht. Sie dienen als Eingangsdaten für eine Methode zur multikriteriellen Entscheidungsfindung, dem Analytic Hierarchy Process (AHP), zur Erhebung von Gewichtungen, die bei der Priorisierung der Instandsetzungsmaßnahmen als Entscheidungshilfe verwendet werden. Als Ergebnis der vorliegenden Studie wurden vier Kategorien von Fehlerursachen ermittelt, die sich zusammenfassend einteilen lassen in Schäden mit Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit der Infrastruktur und Schäden, die mit großer Wahrscheinlichkeit innerhalb kurzer Zeit Änderungen an der strukturellen Zuverlässigkeit des Bauwerks bewirken. Die vorgestellte Methode berücksichtigt bei der Bewertung auch Einflussfaktoren der verschiedenen Fehlerursachen sowie die Subjektivität von Expertenurteilen. Dieser Beitrag soll genauer beleuchten, wie sich aus dem Datenbestand zu älteren Schäden in Kombination mit Expertenwissen Kennzahlen ableiten lassen, die bei der Ermittlung von Fehlerursachen für Instandsetzungsmaßnahmen hilfreich sind.

1. Einleitung

Nachhaltiges Wirtschaftswachstum, anhaltende Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft hängen in Zeiten wiederkehrender Wirtschaftskrisen in hohem Maße von der Zuverlässigkeit und Dauerhaftigkeit der Verkehrswasserbauwerke des Landes ab. Zusätzlich ist eine zuverlässige Infrastruktur auch für den Wohlstand der Bevölkerung unabdingbar. Daher liegt der Instandsetzungsaufwand für das Bestandsnetz bei den deutschen Behörden, die für Verkehrswasserbauwerke zuständig sind und gewährleisten müssen, dass die geplanten Anforderungen an Verfügbarkeit, Leistungsfähigkeit, strukturelle Zuverlässigkeit und Sicherheit während der gesamten vorgesehenen Nutzungsdauer der Anlagen erfüllt sind. Das heterogene Bauwerksportfolio, das unter anderem Schleusen, Wehre, Hebewerke, Düker und Brücken umfasst, ist Schadensmechanismen verschiedenster Art ausgesetzt. Insbesondere die fortschreitenden Schädigungsmechanismen können sich auf die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit der Verkehrswasserbauwerke auswirken. Neben dem baulichen Verfall besteht die Gefahr eines Ausfalls oder vollständigen Versagens dieser Anlagen mit unabsehbaren Kettenreaktionen, deren Folgen weit über einen einfachen Funktionsverlust hinausgehen können.

Ein wesentlicher Faktor für die nachlassende strukturelle Zuverlässigkeit und Funktionalität der Bauwerke ist ihr Alter. Überalterte Bauwerke sind anfälliger für verschiedene Fehlerursachen aufgrund sich ändernder Umweltbedingungen, wiederholter Beanspruchungen oder unzureichender Instandsetzungsmaßnahmen bzw. Erhaltungsmaßnahmen. Auch aufgeschobene Erhaltungsmaßnahmen stellen eine massive Belastung dar. Hier besteht dringender Handlungsbedarf. Etwa 30 % der Schleusen und Wehre im Eigentum der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) des Bundes wurden bereits vor dem Jahr 1900 gebaut. Diese Anlagen haben nicht nur die für sie vorgesehene Nutzungsdauer von etwa 100 Jahren weit überschritten, einige befinden sich sogar trotz dringenden Ersetzungsbedarfs und erheblicher Beeinträchtigung ihrer strukturellen Zuverlässigkeit durch zahlreiche Schädigungsprozesse noch immer im Einsatz. Alterungsprozesse und Schädigungsmechanismen senken das Leistungsniveau und die strukturelle

1,2 Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), francois.nyobeu@baw.de

Zuverlässigkeit und erhöhen damit das Risiko eines Ausfalls bzw. Versagens der Infrastruktur. Auch etliche der Anfang der 1960er Jahre errichteten Verkehrswasserbauwerke, etwa der Main-Donau-Kanal, zeigen unvorhergesehene Schadenserscheinungen mit erheblichen Auswirkungen nicht nur auf ihre Gebrauchstauglichkeit, sondern auch auf ihre strukturelle Zuverlässigkeit. Auch wenn für einige der Verkehrswasserbauwerke bereits Erneuerungsarbeiten begonnen haben, ist es wichtig anzuerkennen, dass Konstruktionsfehler sowie unzureichende oder aufgeschobene Instandsetzungsmaßnahmen die Hauptursachen für die Verschlechterung der Bausubstanz sind.

Infolge der begrenzten Investitionsmittel und personellen Kapazitäten wird die Instandsetzung von Stahlbeton- und Stahlwasserbauten der Bundeswasserstraßen bereits seit Jahrzehnten vernachlässigt, obwohl die Gebrauchstauglichkeit der Wasserbauwerke in hohem Maße von der Häufigkeit und Qualität der Erhaltungsmaßnahmen abhängt. Überalterte Materialien, unzureichende Erhaltungsmaßnahmen und übermäßig lange Nutzungsdauern tragen ebenfalls zur Schwächung von Verkehrswasserbauwerken bei und erhöhen ihre Anfälligkeit für andere umweltbedingte Stressfaktoren. In Anbetracht der großen Vielfalt der Bauwerke entwickelt die WSV seit 2008 ein Erhaltungsmanagementsystem (EMS-WSV), das den Entscheidungsprozess bei der Priorisierung von Instandsetzungsmaßnahmen unterstützen soll. Der große Instandsetzungsrückstand führt zu einem unnötig schnellen Rückgang des Bauwerksbestands und das breit eingeführte EMS-WSV stößt allmählich an seine Kapazitätsgrenzen.

Im vorliegenden Beitrag wird eine Methode zur Optimierung von Entscheidungen bezüglich der Priorisierung verschiedener Fehlerursachen vorgestellt, die durch die Anwendung der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) ermittelt werden. Dabei wird auch die potenzielle Gefährdung der Schäden für die funktionalen und strukturellen Anforderungen der Bauwerke berücksichtigt. Der in dieser Studie entwickelte analytische Hierarchieprozess (AHP) bietet die Möglichkeit, die kausalen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Kriterien und Fehlerursachen zu erfassen und zu bewerten. Der AHP erlaubt darüber hinaus eine Gesamtbetrachtung des von den einzelnen Fehlerursachen ausgehenden absoluten Risikos, sodass eine Priorisierung der Fehlerursachen mit dem dringendsten Instandsetzungsbedarf möglich ist. Zur Veranschaulichung des Verfahrens wird hier eine vergleichende Analyse mehrerer Fehlerursachen mit Auswirkungen auf die Stahlbetonbauteile von Schleusen beschrieben. Der Rest des Beitrags gliedert sich wie folgt: In Abschnitt 2 wird das Erhaltungsmanagementsystem (EMS-WSV) der WSV in einem Überblick vorgestellt. In Abschnitt 3 wird insbesondere die Methode zur Entwicklung der für die Analyse benötigten Kennzahlen erläutert, und Abschnitt 4 erörtert die praktische Anwendung und Effektivität des vorgeschlagenen AHP anhand einer Fallstudie mit verschiedenen Fehlerursachen, die sich auf die Zuverlässigkeit von Stahlbetonbauwerken auswirken.

2. BAUWERKSINSPEKTION/ZUSTANDSBEWERTUNG

2.1 Inspektionsverfahren

Die Datengrundlage der aktuellen Instandsetzungsstrategien für Verkehrswasserbauwerke in Deutschland bilden Schadensdaten, die bei regelmäßigen Bauwerksprüfungen erfasst werden. Für die Festlegung von Art, Ausmaß und Umfang der Inspektionen wird ein zeitbasierter Ansatz verfolgt. Er deckt sich mit der Einteilung der Verkehrswasserbauwerke in die Kategorien A und B. Nach Kategorie A zu inspizierende Bauwerke sind einer Bauwerksprüfung, -überwachung und -besichtigung zu unterziehen. Bei Bauwerken der Kategorie B ist nur eine Besichtigung erforderlich (BMVI, 2009). Die Bauwerksprüfung findet alle sechs Jahre statt, die Bauwerksüberwachung drei Jahre nach der Bauwerksprüfung. Bei der Bauwerksprüfung beurteilt ein sachkundiger Ingenieur die strukturelle Zuverlässigkeit jedes einzelnen Bauteils des Bauwerks im Hinblick auf die Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit (BMVI, 2009). Die ermittelten Schäden werden einzeln erfasst, bewertet, ausgewertet entsprechend ihren Auswirkungen auf die strukturellen Anforderungen (strukturelle Zuverlässigkeit und Gebrauchstauglichkeit) an die Bauteile und das gesamte Bauwerk und in das Programmsystem WSVPruf dokumentiert.

Ziel der Bauwerksprüfung ist die Erkennung und Beurteilung fortschreitender Schädigungsmechanismen als Grundlage fundierter strategischer Entscheidungen zum Erhaltungs-, Instandsetzungs- oder Ersetzungsbedarf. Im Einzelnen werden bei der Bauwerksprüfung der aktuelle Zustand der Bauwerke und die vorherrschenden strukturellen Mängel festgestellt. Werden im Zuge einer eingehenden Inspektion bestimmte Schäden (Risse, Bewehrungskorrosion usw.) nachgewiesen, die die Zuverlässigkeit oder Funktionsfähigkeit eines Objektteils bzw. Bauwerks gefährden könnten, sind Maßnahmen zu ergreifen, die den Schaden eingrenzen soll oder einen Ausfall des Bauteils bzw. einen nachfolgenden Einsturz des Bauwerks verhindern sollen.

Sämtliche bei einer eingehenden Inspektion festgestellten Schäden werden mit Zustandsnoten auf einer Skala von 1 bis 4 bewertet (1 = guter Zustand (CGgen); 4 = schlechter bzw. „kritischer“ Zustand). Mithilfe des Erhaltungsmanagementsystems WSV-Pruf wird auf der Basis der erfassten Schäden eine Gesamtzustandsnote für jedes Bauwerk generiert. Die Zustandsnote dient als Grundlage für die Entscheidung über den Instandsetzungsbedarf des Bauteils/Bauwerks.

2.2 Ergebnisse der aktuellen Zustandsbewertung

Abbildung 1 zeigt einen Vergleich der Gesamtzustandsnote für Schleusen und Wehre mit den Zustandsnoten verschiedener Stahlbetonkonstruktionen. Aus der Abbildung 1 wird deutlich, dass der Zustand der Mehrzahl der Verkehrswasserbauwerke (Schleusen und Wehre) als ausreichend oder nicht ausreichend bewertet wird. Demzufolge sind die Bauwerke in ihrer Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit beeinträchtigt und es besteht in naher Zukunft ein Bedarf für umfassende Instandsetzungsmaßnahmen. Ebenso wird der Zustand von 33,54 % der Schleusen und 12,55 % der Wehre bereits als „kritisch“ eingestuft. Diese Kategorie von Wasserbauwerken zeigen deutlich fortgeschrittene Schädigungsmechanismen. Diese Gruppe von Bauwerken repräsentiert den aktuellen Instandsetzungsrückstand der WSV, der dringend abgebaut werden muss. Zur Verbesserung der Entscheidungsprozesse in Bezug auf den Instandsetzungsbedarf hat die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) seit 2008 im Rahmen des EMS-WSV ein Prognosemodell eingeführt, mit dem sich der zukünftige Zustand eines Bauwerks unter Zugrundelegung der aktuellen Zustandsnoten vorausberechnen lässt.

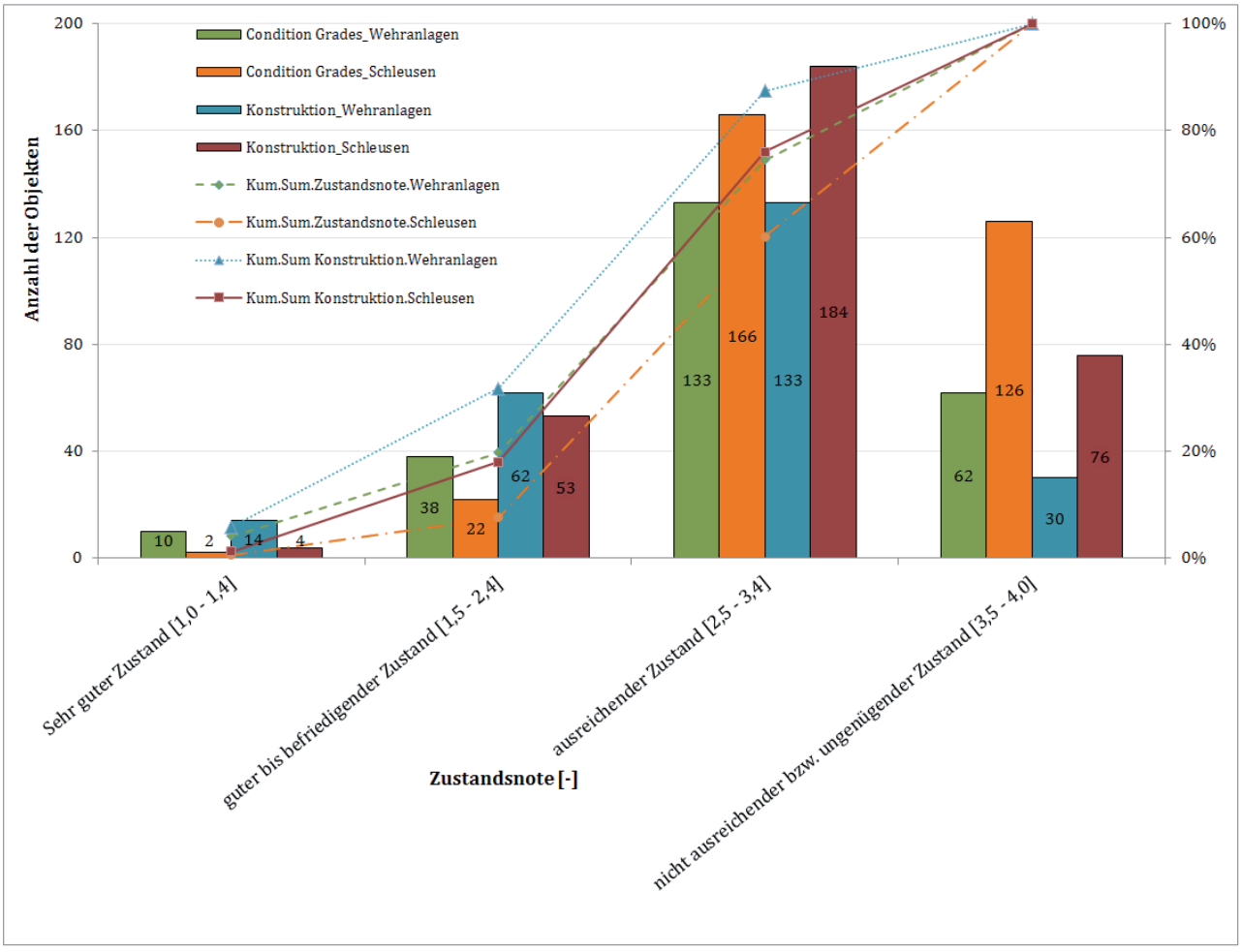


Abbildung 1: Verteilung der Zustandsnoten für ganze Bauwerke und Stahlbetonkonstruktionen („Konstruktion") von Schleusenanlagen und Wehren in Deutschland (WSVPruf, 2018)

2.3 Nachteile des aktuellen Zustandsbewertungsverfahrens

Obwohl die aktuelle Gesamtzustandsnote lediglich als Entscheidungskriterium für die Notwendigkeit von Instandsetzung- oder Erneuerungsmaßnahmen dienen kann, werden die Auswirkungen von Schäden auf die strukturelle Zuverlässigkeit des Bauwerks nicht berücksichtigt. Daher ist keine weitere Differenzierung der großen Anzahl an Konstruktionen mit einer kritischen Zustandsnote zwischen 3,8 und 4 möglich. Zudem werden die Unsicherheiten und subjektiven Wahrnehmungen, die unweigerlich mit Inspektionen auf Basis von regelmäßigen visuellen Prüfungen und Expertenwissen verbunden sind, im Entscheidungsprozess nicht ernsthaft erachtet. Nicht zuletzt besteht der Nachteil, dass sich die Ausrichtung des aktuellen Zustandsbewertungssystems auf den schlimmsten Einzelschaden, der an Konstruktion oder Bauteil festgestellt wurde, konzentriert. Ein beträchtlicher Teil der bei Inspektionen erfassten Daten wird daher derzeit nicht in einer Form zur Verfügung gestellt, die Vergleichbarkeit ermöglicht. Aufgrund der genannten Nachteile sind die derzeitigen Entscheidungsprozesse im Hinblick auf Instandsetzungsmaßnahmen nicht transparent, umfassend und von ausreichender Beweiskraft. Weiterhin sollte das sich abzeichnende Risiko eines Infrastrukturausfalls in der aktuellen Zustandsnote einfließen.

3. Entscheidungen auf Basis einer qualitativen Risikoanlalyse

Die zunehmende technische Komplexität großer Infrastrukturbauwerke und Industrieprodukte sowie die erheblichen Bedenken der Öffentlichkeit bezüglich der Sicherheit gaben den Anstoß für vermehrte Anstrengungen in der Forschung und Entwicklung neuer Risikoanalyse- und Sicherheitsbewertungsverfahren (Bhushan und Rai, 2004). Für die Modellierung und Analyse komplexer Risikoszenarien werden jedoch zunehmend historische Schadensdaten und fundiertes Expertenwissen mit ausreichender Aussagekraft für qualitative und quantitative Auswertungen benötigt. Bei der Risikobewertung großer Infrastrukturbauwerke können sich außerdem probabilistische Ansätze als schwierig erweisen, wenn die Daten überwiegend in Form von Expertenwissen oder qualitativen Informationen vorliegen.

3.1 Nutzung von Expertenwissen in Fehlermöglichkeits- und Einflussanalysen (FMEA)

Die FMEA wurde bereits in den 1960er Jahren als formales Konstruktionsverfahren entwickelt, um die strukturelle Zuverlässigkeit und Sicherheit in der Luft- und Raumfahrt sicherzustellen. Inzwischen ist die FMEA auch in anderen Industriezweigen weit verbreitet, so zum Beispiel in der Automobilindustrie, Nukleartechnik, Elektronik, Chemie und Medizintechnik (Gilchrist, 1993; Bertolini et al., 2004; Bowles, 2004; Liu, 2016). Unserer Kenntnis nach wurde die Methode jedoch noch nicht explizit zur Bewertung der strukturellen Zuverlässigkeit von Ingenieurbauwerken eingesetzt. In der umfangreichen Literatur existieren je nach Zielsetzung, Art der FMEA und Anwendungsbereich verschiedene Definitionen der FMEA. In Anlehnung an Stamatis (2003) wird die FMEA definiert als *„eine ingenieurwissenschaftliche Technik, mit der sich bekannte bzw. mögliche Defekte, Probleme, Fehler usw. in System, Konstruktion, Prozess und/oder Dienst definieren, identifizieren und beseitigen lassen, noch bevor sie vom Verbraucher bemerkt werden.“* Auf ähnliche Weise beschreibt Lui (2016) die FMEA als ein *„systematisches Verfahren zur Identifizierung bekannter und potenzieller Fehlerarten und ihrer Ursachen sowie der Auswirkungen von Fehlern auf das System oder den Endbenutzer mit dem Ziel, das mit den ermittelten Fehlerarten verbundene Risiko zu bewerten, hinsichtlich proaktiver Maßnahmen zu priorisieren und für die dringlichsten Probleme Korrekturmaßnahmen zu ergreifen, um die Zuverlässigkeit und Sicherheit von Produkten, Prozessen, Entwürfen oder Diensten zu erhöhen.“*

Die FMEA ist in hohem Maße auf Expertenwissen angewiesen und gilt daher als qualitativer Ansatz zur Risikobewertung. Zur Erkennung potenzieller Bemessungs- und Prozessfehler im System noch vor ihrem Auftreten wird die FMEA durch die Ursache-Wirkungsketten unterstützt, sodass das Risiko eines Versagens durch Empfehlung von Konstruktionsänderungen oder gegebenenfalls Anpassung der Betriebsabläufe minimiert werden kann. Nach Lui (2016) besteht das übergeordnete Ziel der FMEA besteht darin die Analysten bei der Priorisierung der Fehlerarten in System, Bemessung, Prozess, Produkt oder Dienst unterstützen zu können, damit die begrenzten Ressourcen jeweils den Elementen mit dem höchsten Risikopotenzial zugewiesen werden können. Das traditionelle FMEA-Verfahren wird in zwei Stufen durchgeführt: Analyse des Systems (Schritte 1 bis 3) und Risiko- oder Kritikalitätsbewertung (Schritte 4 und 5). Die hier umgesetzte FMEA enthält die folgenden Schritte:

- Schritt 1: Beschreibung der Konstruktion und Komponenten des zu analysierenden Systems;
- Schritt 2: Definition der Funktionen ausgewählter Komponenten, Subsysteme oder Systeme;

- Schritt 3: Identifizierung der für die einzelnen Komponenten relevanten Fehlerarten und Fehlerursachen sowie ihrer Auswirkung auf Komponenten, Subsysteme und Gesamtsystem;

- Schritt 4: Berechnung der Risikoprioritätszahl (RPZ); entsprechende Anordnung der Fehlerarten in einer Rangfolge und Ermittlung des Fehlers mit dem dringendsten Instandhaltungsbedarf;

- Schritt 5: Vorschlag von Verbesserungsmaßnahmen zur Risikominimierung und Verbesserung der Systemleistung.

Die Definition der Fehlerarten, Fehlerursachen und Fehlerfolgen hängt in einer herkömmlichen FMEA von der Analyseebene und den Kriterien für die Beurteilung des Versagensrisikos ab. Die FMEA gilt daher als hierarchischer Modellierungsprozess zur Anordnung von Attributen in einer Baumstruktur nach der Top-Down- oder Bottom-Up-Methode. Eine wesentliche Aufgabe einer System- oder Infrastrukturanalyse besteht demzufolge in der hierarchischen Zerlegung eines Systems in seine Hauptbestandteile (siehe Panenka & Nyobeu, 2018b). Mit der Zerlegung wird grundsätzlich die Absicht verfolgt, die Hauptbestandteile zu ermitteln, die maßgeblich zur Erfüllung der strukturellen und leistungsbezogenen Anforderungen beitragen. Sobald diese Komponenten in einer Infrastruktureinrichtung ausfindig gemacht wurden, können mittels der FMEA Fehlerarten, die sich auf die strukturelle Zuverlässigkeit der Komponenten auswirken, ermittelt, bewertet und minimiert werden.

Die FMEA bietet sowohl qualitative als auch quantitative Maßnahmen zur Ermittlung von Fehlerarten und ihrer Auswirkungen auf die Qualität bzw. strukturelle Zuverlässigkeit von Produkten/Systemen. In einer konventionellen FMEA wird das Fehlerrisiko mithilfe der Risikoprioritätszahl (RPZ) bestimmt. Sie ist das Produkt aus der Wahrscheinlichkeit oder Häufigkeit des Auftretens (A) eines Fehlers, der Wahrscheinlichkeit der Entdeckung (E) des Fehlers vor Eintreten der Fehlerfolge und der Bedeutung (B) bzw. des Schweregrads der Fehlerfolge (siehe Abbildung 2).

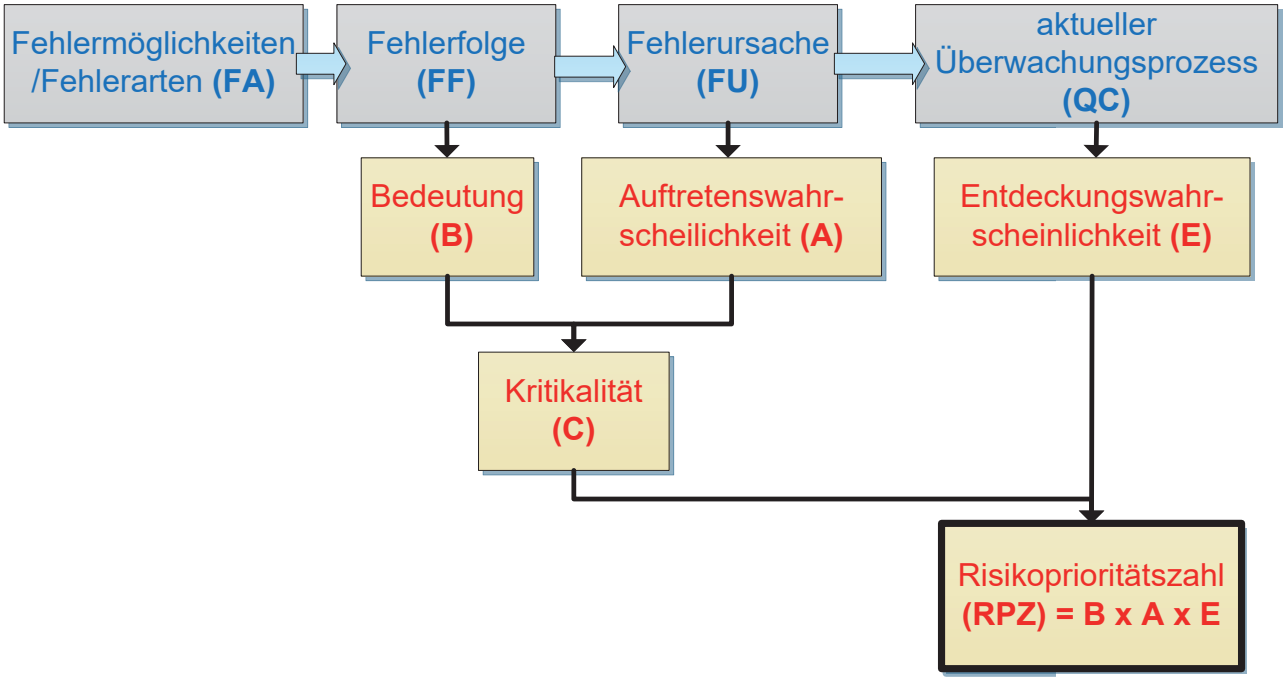


Abbildung 2: Ursache-Wirkungskette in einer konventionellen FMEA

In diesem Zusammenhang ist zu betonen, dass weitere relevante Risikokriterien wie wirtschaftliche Aspekte, Sicherheitsfragen, Relevanz von Ausstattung/System, Erhaltungskosten, Versagensrate, mittlere Instandsetzungszeit und Betriebsbedingungen bei der Fehlerrisikoanalyse häufig außer Acht gelassen werden. Die Berechnung der RPZ erfolgt durch Zuordnung von Werten zwischen 1 und 10 zu den drei ausgewählten Risikokriterien. Die so ermittelten RPZ-Ergebnisse liegen zwischen 1 und 1000. Je höher die RPZ, desto größer ist das Risiko eines Konstruktionsversagens (Lui, 2016).

3.2 Erweiterung der Risikopriorisierung mit dem analytischen Hierarchieprozess (AHP)

In die FMEA können zwar Intuition, Urteil und Erfahrung der Entscheidungsverantwortlichen mit einfließen, es ist jedoch nicht möglich, der subjektiven Wahrnehmung Rechnung zu tragen, eine Fehlerart (FA) oder ein Risikofaktor sei wichtiger für die Risikobewertung als andere. Dies ist eine der größten Schwachstellen der FMEA. Die RPZ kann kein subjektives Urteil abbilden, da ihre Berechnung traditionell mittels Multiplikation der Einzelwerte der drei Risikofaktoren A, B und E erfolgt. Um diese Schwachstelle auszugleichen und die klassische FMEA durch Berücksichtigung dieser potenziellen Beziehungen zwischen den Fehlerursachen oder Risikokriterien (d. h. A, B und E) zu erweitern, kommt in dieser Studie der im Jahr 1980 von Saaty entwickelte analytische Hierarchieprozess (Analytical Hierarchy Process, AHP) (Saaty, 2008) zum Einsatz. Anstelle einer Bewertung jeder Fehlerart durch separate Bestimmung der RPZ, wird nun mithilfe des AHP der Einfluss der einzelnen Fehlerarten gewichtet und als Kriterium für die Priorisierung verwendet.

Der AHP ist eine leistungsstarke, flexible und auf mehreren Kriterien basierende Entscheidungshilfe. Komplexe Entscheidungsprobleme werden in verschiedene Entscheidungsebenen aufgegliedert, die neben quantitativen auch qualitative Aspekte abbilden. Subjektive und objektive Bewertungen werden zudem in einem integrativen Analyserahmen kombiniert, der auf Verhältnisskalen aus einfachen paarweisen Vergleichen basiert. Dies vereinfacht die Analyse, weil die kritischen Aspekte eines Problems in einer hierarchischen Struktur angeordnet werden können (Saaty, 1990 & 2008). Saaty (1987) beschreibt den AHP als einen *„nichtlinearen Rahmen für induktives und deduktives Denken ohne Verwendung eines Syllogismus. Mehrere Faktoren werden gleichzeitig berücksichtigt, Abhängigkeiten und Feedback werden einbezogen und die Synthese oder Schlussfolgerung erfolgt durch numerische Trade-offs.“* Da die Kombination aus zwei oder mehreren Fehlerarten in der Regel zu signifikanten Fehlern oder Ausfällen führt, werden die Einflussgrößen der verschiedenen Fehlerarten bestimmt und als Kriterium für ihre Priorisierung herangezogen. Im AHP wird von einer unidirektionalen hierarchischen Beziehung zwischen den Entscheidungsebenen ausgegangen. Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Systemkomponenten werden jedoch

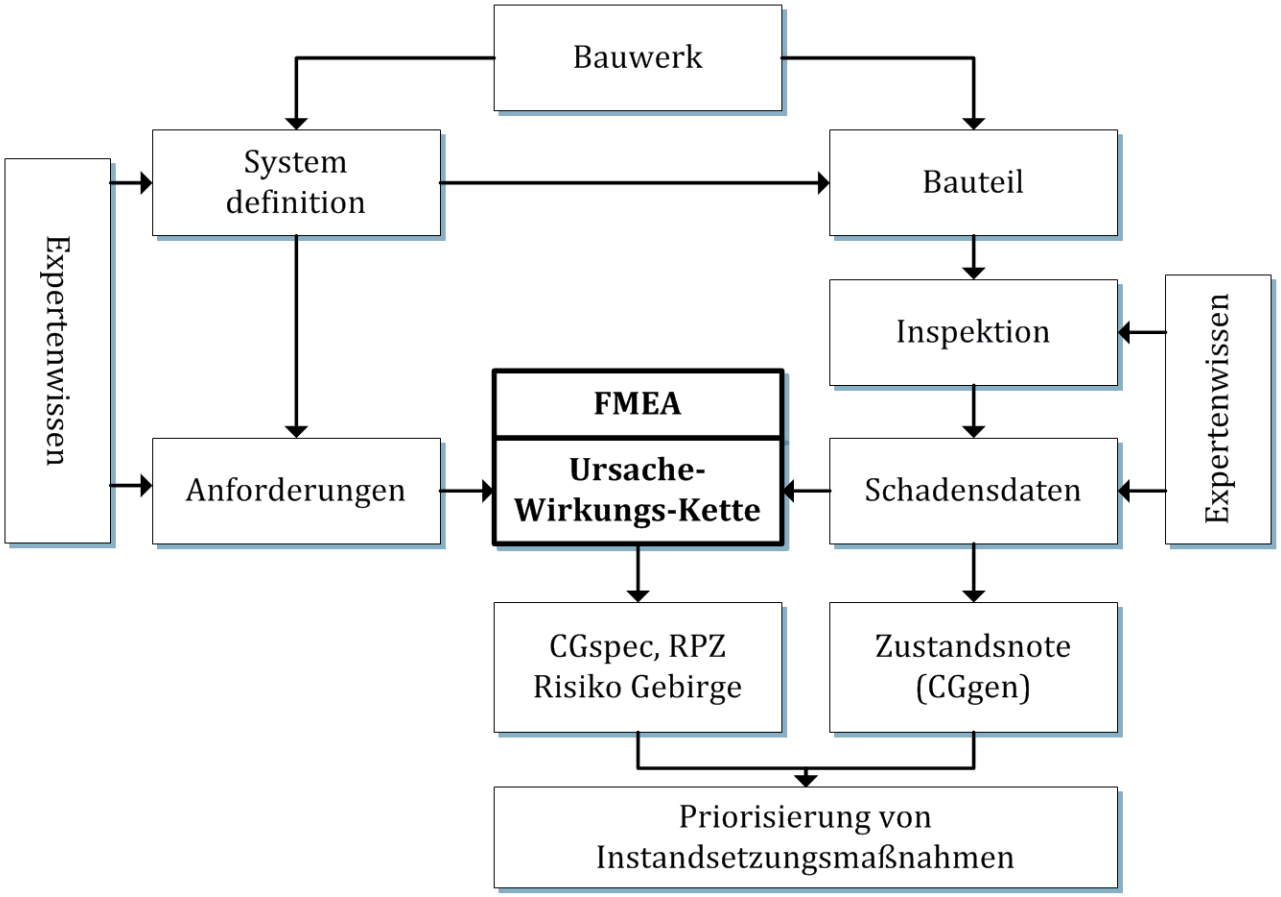


Abbildung 3: Einsatz der FMEA in der Zustandsbewertung von Verkehrswasserbauwerken (Panenka & Nyobeu, 2018b)

auch berücksichtigt. In einer *„Supermatrix“* können gewichtete Prioritäten kombiniert werden (Saaty, 2008). Der AHP ist ein dreistufiges Verfahren zur hierarchischen Aufgliederung eines komplexen Problems. An oberster Stelle steht das allgemeine Entscheidungsziel, die verschiedenen Kriterien, Unterkriterien und Entscheidungsalternativen sind jeweils untergeordnet. Die Entscheidungsverantwortlichen bzw. Entscheidungsträger vergleichen die einzelnen Faktoren in einer Paarvergleichsmatrix mit allen anderen Faktoren auf derselben Hierarchieebene und ermitteln so die gewichtete Priorität oder relative Bedeutung der Faktoren. Die optimale Lösung ist die Alternative mit der größten kumulierten Gewichtung (Saaty, 1990). Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass in diesem Kontext das Adjektiv „relativ“ verwendet wird, weil die Prioritäten der Kriterien immer im Verhältnis zueinander bewertet werden.

3.3 Die vorgeschlagene FMEA-AHP-Methode

Mit der vorgeschlagenen Methode soll die Aussagekraft der im EMS-WSV erfassten aktuellen Zustandsnote verbessert werden. Zu diesem Zweck wird eine Einflussbeziehung zwischen den strukturellen Systemanforderungen und den möglichen Risiken eines Systemversagens hergestellt. Zusätzlich werden neue Kennzahlen generiert, die die Entwicklung gemeinsamer Erhaltungs- und Ausbaustrategien unterstützen können (siehe Abbildung 3, Panenka und Nyobeu, 2018b).

Eine Entscheidung kann als Wahl einer Alternative aus einer Menge an Alternativen unter Beachtung eines übergeordneten Ziels oder Kriteriums angesehen werden. Für eine Entscheidung können folglich statt nur eines Kriteriums auch mehrere Kriterien zugrunde gelegt werden. Dazu müssen

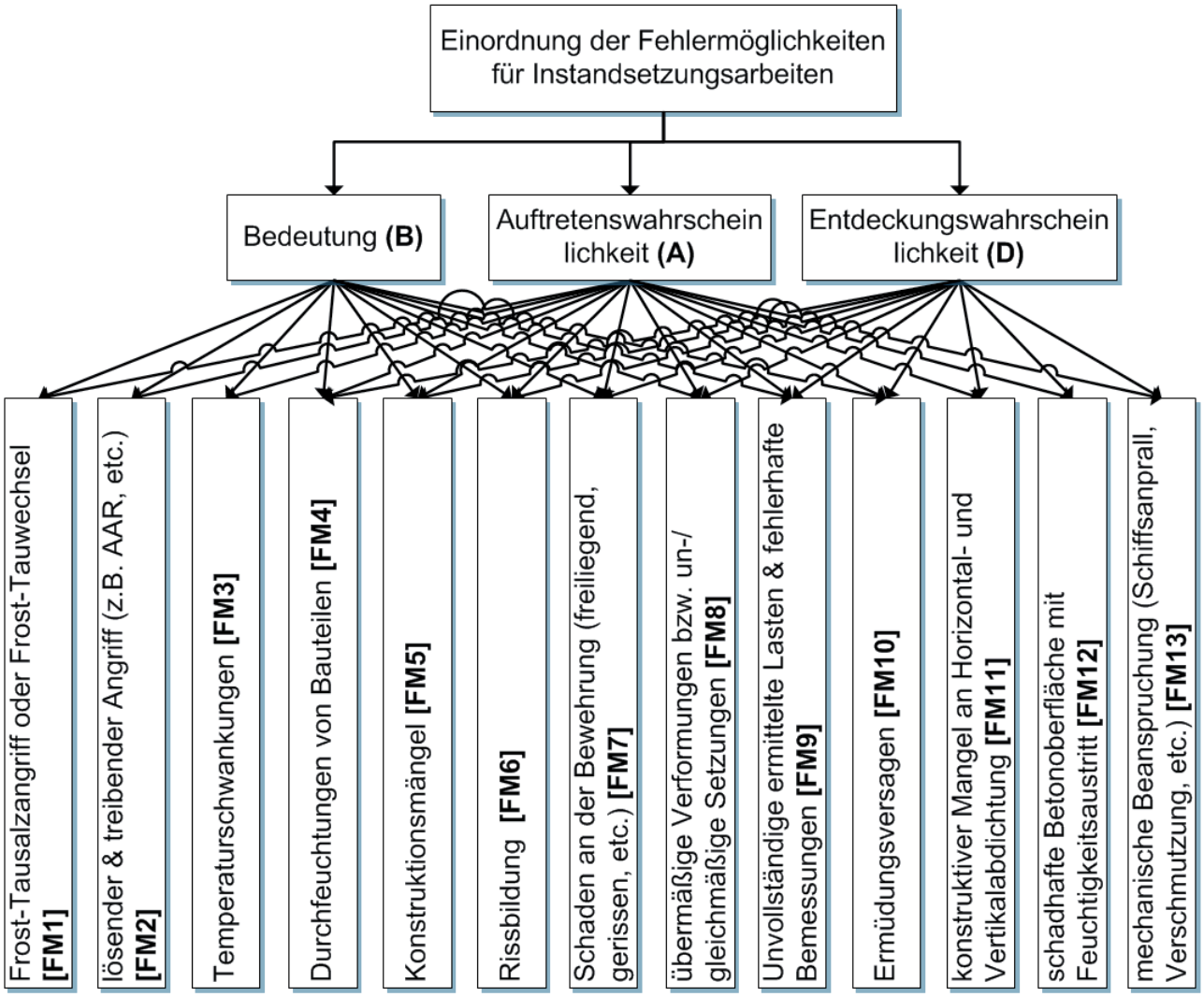


Abbildung 3: Einsatz der FMEA in der Zustandsbewertung von Verkehrswasserbauwerken (Panenka & Nyobeu, 2018b)

zunächst verschiedene Kriterien beurteilt und dann die Alternativen auf Grundlage jedes einzelnen Kriteriums bewertet werden. Am Ende des Prozesses werden die Bewertungen aggregiert und die bewerteten Alternativen hinsichtlich des verfolgten Ziels in eine relative Rangfolge gebracht. Saaty (2008) hat die zwingende Notwendigkeit der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung klar erkannt und wies darauf hin, dass *„wir für Entscheidungen auch Wissen benötigen über Problemstellung, Entscheidungsziel und -zweck, Entscheidungskriterien, untergeordnete Kriterien, Beteiligte, betroffene Gruppen sowie Alternativmaßnahmen."* Er stellte weiter fest, dass Ermittlungsverfahren zur Wahl der besten Alternative oder, im Falle von Ressourcenverteilungen, des geeigneten Anteils an der begrenzten Ressourcenmenge, durch Prioritäten gestützt werden müssten. Wenn konkret das vorrangige Ziel der Erhaltungsmanagementstrategie darin besteht, die verschiedenen Fehlerarten hinsichtlich der Instandsetzungsmaßnahmen zu kategorisieren, so können die Risikokriterien/-faktoren der FMEA als Bewertungskriterien und die identifizierten Fehlerarten als Alternativen gelten. Die Entscheidung für ein Ranking mehrerer Fehlerarten in Bezug auf Instandsetzungsmaßnahmen wird in eine hierarchische Struktur mit mehreren Ebenen zerlegt, wobei das Ziel auf der oberen Ebene, die Entscheidungskriterien in der Mitte und die identifizierten Alternativen auf der unteren Ebene angeordnet sind (siehe Abbildung 4).Ein strukturiertes Entscheidungsverfahren für die Generierung von Prioritäten für Alternativen muss in diesem Zusammenhang die Entscheidung in die folgenden Schritte aufgliedern:

a) Durchführung einer FMEA zur Identifizierung der möglichen Fehlerursachen;

b) Erstellung einer hierarchischen Struktur. Der Entscheidungsprozess, der das zu lösende Problem beschreibt, wird in eine Hierarchie aus Zielen, Kriterien, Unterkriterien und Alternativen (d. h. Fehlerarten) zerlegt. Dieses Verfahren wird auch als Entscheidungsmodellierung bezeichnet; es geht dabei lediglich darum, eine Hierarchie als Grundlage für die Analyse der Entscheidung anzulegen (siehe Abbildung 4);

c) Erstellung mehrerer Paarvergleichsmatrizen für die Präferenzanalyse. Mit Blick auf das gewünschte Ziel sollen die relative Wichtigkeit der einzelnen Kriterien in einem paarweisen Vergleich ausgewertet und die relativen Prioritäten daraus abgeleitet werden. Um eine akzeptable Konsistenz der Beurteilungen in Bezug auf Proportionalität und Transitivität sicherzustellen, wird eine Konsistenzprüfung vorgenommen. Da jedes Kriterium eine andere relative Wichtigkeit oder Gewichtung aufweisen kann, werden die relativen Prioritäten mittels paarweiser Vergleiche auf einer von Saaty (1987) eingeführten numerischen Vergleichsskala hergeleitet (siehe Tabelle 1).

Intensität der Wichtigkeit	Definition	Erläuterung
1	Gleichwertige Bedeutung	Zwei Aktivitäten tragen gleichermaßen zum Ziel bei
3	Mittlere Bedeutung	Erfahrung und Urteilsvermögen begünstigen eine Tätigkeit leicht gegenüber einer anderen
5	Starke Bedeutung	Erfahrung und Urteilsvermögen begünstigen eine Tätigkeit stark gegenüber einer anderen.
7	Sehr stark oder nachgewiesene Bedeutung	Eine Aktivität wird sehr stark gegenüber einer anderen bevorzugt; ihre Dominanz zeigt sich in der Praxis.
9	Extreme Bedeutung	Die Beweise, die eine Aktivität gegenüber einer anderen bevorzugen, sind von der höchstmöglichen Bestätigungsordnung..
2,4,6,8	Für Kompromisse zwischen den oben genannten Werten	Manchmal muss man ein Kompromissurteil numerisch interpolieren, weil es kein gutes Wort gibt, um es zu beschreiben.

Reziproke der oben genannten Werte	Wenn Aktivität i im Vergleich zu Aktivität j eine der obigen ungleich Nullzahlen zugeordnet hat, dann hat j den Kehrwert im Vergleich zu i.	Ein Vergleich, der durch die Wahl des kleineren Elements als Einheit erforderlich ist, um das größere Element als ein Vielfaches dieser Einheit zu schätzen.
Rationalen	Kennzahlen, die sich aus der Skala ergeben	Wenn die Konsistenz erzwungen werden soll, indem n numerische Werte erhalten werden, um die Matrix zu überspannen.
1.1 – 1.9	Für geknüpfte Aktivitäten	Wenn die Elemente nahe beieinander liegen und fast nicht unterscheidbar sind, ist moderat 1,3 und extrem 1,9.

Tabelle 1: Bewertungsskala zur Ermittlung der relativen Präferenz für den paarweisen Vergleich (Saaty, 2008)

d) Ableitung lokaler Prioritäten oder relativer Präferenzen für die Alternativen. In der Paarvergleichsskala von Saaty werden die Prioritäten der Alternativen für jedes Kriterium getrennt abgeleitet (in einem Prozess ähnlich wie im vorherigen Schritt, das heißt, die Alternativen werden hinsichtlich jedes Kriteriums paarweise verglichen). Auch hier wird die Konsistenz der Expertenurteile geprüft und gegebenenfalls angepasst.
e) Ableitung allgemeiner Prioritäten oder Gewichtungen für die Kriterien (Modellsynthese). Verschiedene aus der vorherigen Analyse gewonnene Prioritäten werden unter Einbeziehung der Gewichtung jedes Kriteriums zu einer gewichteten Summe aggregiert, die die Gesamtprioritäten der Alternativen wiedergibt. Anschließend wird die Alternative mit der höchsten Gesamtpriorität identifiziert, die gleichzeitig das kritischste Problem oder die bevorzugte Wahl für Instandsetzungsmaßnahmen darstellt.
f) Durchführung einer Sensitivitätsanalyse. In dieser Analyse wird untersucht, welche Auswirkung eine Veränderung in den Gewichten des einflussreichsten Kriteriums auf die allgemeinen Prioritätsgewichte verschiedener Alternativen hat, um den logischen Zusammenhang der erzielten Ergebnisse zu verstehen.
g) Endgültige Entscheidung. Basierend auf den Ergebnissen der Synthese und der Sensitivitätsanalyse kann eine Entscheidung getroffen werden.

4. Fallstudie

4.1 Ganzheitliche Zuweisung von Prioritäten durch Paarvergleiche

Die für die Erhaltung von Wasserstraßen zuständigen Fachleute müssen sich mit den verschiedensten Fragestellungen auseinandersetzen, zum Beispiel, welche der Fehlerursachen ein besonders hohes Risiko für die strukturelle Zuverlässigkeit von Verkehrswasserbauwerken darstellen und welche Einflussbeziehungen zwischen den verschiedenen Fehlerursachen bestehen. Eines ihrer vorrangigen Ziele ist daher die Ausarbeitung einer zustands- und risikobasierten Erhaltungsstrategie, mit der sich der riesige aufgestaute Instandsetzungsbedarf bestmöglich bewältigen lässt. Daher wird in der Fallstudie des vorliegenden Beitrags ein Lösungsansatz für das heikle Problem der Bewertung von Risikoprioritäten für verschiedene Fehlerursachen entwickelt, bei dem der AHP zum Einsatz kommt. Mithilfe der Prioritäten können die dringlichsten Schäden hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die strukturelle Zuverlässigkeit herausgearbeitet und die entsprechenden Instandsetzungsmaßnahmen eingeleitet werden. Hierfür werden in erster Linie die drei Entscheidungskriterien Bedeutung (B) der Fehlerfolge, Auftretenswahrscheinlichkeit (A) sowie Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) verwendet. Zur Ableitung der relativen Prioritäten (Gewichtungen) und zur Bestimmung ihrer relativen Wichtigkeit für die Erfüllung des Gesamtziels einer Klassifizierung verschiedener Fehlerursachen mit Instandsetzungsbedarf müssen diese Kriterien einem Vergleich unterzogen werden.

Auf der Basis der grundlegende Skala werden Vergleiche angestellt, die die relative Stärke von Präferenzen und Eindrücken wiedergeben. Die Ergebnisse dienen als Kerne für Fredholm-Operatoren, aus denen sich Verhältnisskalen in Form von Haupteigenvektoren oder Eigenfunktionen ableiten lassen (Saaty, 1987 und Saaty, 1990). Diese Vergleiche sind die Grundlage für die Anwendung des AHP. Zunächst muss die relative Priorität jedes der drei Kriterien in einer paarweisen Gegenüberstellung festgestellt werden, sodass eine Paarvergleichsmatrix generiert wird. Die Vergleiche basieren auf Beurteilungen, die durch Zahlen aus der grundlegenden Skala repräsentiert werden.

Aus den nachstehenden Matrizen lässt sich ablesen, dass jeweils ein Elementpaar (ij) aus einer Hierar-

chieebene in Bezug auf ein unmittelbar übergeordnetes Element verglichen wird, das als gemeinsame Eigenschaft oder gemeinsames Kriterium dient. Dabei wird beurteilt, in welchem der Elemente mehr oder weniger von der Eigenschaft vertreten ist und in welchem Ausmaß. Eine typische Fragestellung für einen Eintrag in der Vergleichsmatrix würde wie folgt lauten: Welches der beiden Elemente i (linke Spalte der Matrix) und j (obere Zeile der Matrix) hat mehr von der Eigenschaft oder erfüllt die Kriterien besser, das heißt, welches Element hat in Bezug auf das betreffende Kriterium eine größere Bedeutung und um wie viel größer ist die Bedeutung (hierfür werden die Werte der grundlegenden Skala aus Tabelle 1 verwendet)? Das Ergebnis ist aij (oder aji). Der Reziprokwert für die transponierte Matrix wird automatisch eingefügt. Die Fragestellung beim paarweisen Vergleich kann einen Einfluss auf die Beurteilungen und damit auf die Prioritäten haben (siehe Tabelle 2).

4.2 Zuweisung der Bewertung verschiedener Kriterien/Ableitung von Prioritäten (Gewichtungen) für die Kriterien

Zur Ableitung der Prioritätsgewichte der Kriterien wird die Wichtigkeit der verschiedenen Kriterien hinsichtlich des gewünschten Ziels einem paarweisen Vergleich unterzogen (siehe Tabelle 2). Da der Anteil der Inkonsistenz CR = 0,0036 kleiner als 0,1 ist, kann von einer hinreichenden Konsistenz der verwendeten Bewertungsmatrix ausgegangen werden.

Die normalisierten Prioritäten können auch in ihrer Idealform ausgedrückt werden, indem jede Priorität durch die höchste Priorität 0,6479 (für das Kriterium Bedeutung der Fehlerfolgen) dividiert wird. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen grundsätzlich die folgenden Anteile an der Gesamtgewichtung: Bedeutung 64,79 %, Auftreten 22,99 % und Entdeckung 12,22 %. Im Anschluss wird das Kriterium Bedeutung als das wichtigste Kriterium für das Ranking der verschiedenen Fehlerursachen im Hinblick auf Instandsetzungsmaßnahmen eingestuft. Danach kann der Anteilswert für Auftreten und Entdeckung abgeleitet werden. Die Ergebnisse dieser Kriterienbewertung zeigen deutlich, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Fehlerursache etwa 35,48% so hoch ist wie die Bedeutung seiner Fehlerfolge und die Wahrscheinlichkeit, dass ein potenzieller Fehlerart erkannt wird, etwa 18,86% so hoch ist wie die Bedeutung seiner Fehlerfolgen.

4.3 Ableitung lokaler Prioritäten (Präferenzen) für die Alternativen: Auswertung von Alternativen auf Basis der bewerteten Kriterien

Im nächsten Schritt werden Vergleichsmatrizen für die Fehlerursachen (Alternativen) erstellt, die in Bezug auf jedes der ermittelten Kriterien verglichen werden. Da die abgeleiteten Prioritäten nur in Bezug auf das spezifische Kriterium Gültigkeit haben, werden sie häufig als lokale Prioritäten bezeichnet. Es werden somit drei weitere Paarvergleichsmatrizen erstellt, um auf Basis der Gewichtung der Alternativen bezogen auf ein gemeinsames Kriterium für jede Alternative lokale Prioritäten abzuleiten.

	Bedeutung (**B**)	Auftreten (**A**)	Entdeckung/ Erhaltung (**E**)	**Normalisierte Prioritäten (Gewichtungen)**	**Idealisierte Prioritäten (Gewichtungen)**
Bedeutung (**B**)	1	3	5	**0.6479**	**100%**
Auftreten (**A**)	1/3	1	2	**0.2299**	**35.48%**
Entdeckung/ Erhaltung (**E**)	1/2	1/2	1	**0.1222**	**18.86%**
λ_{max} **= 3.004**	**CI = 0.0018**		**CR = 0.0036**		

Tabelle 2: Paarvergleichsmatrix für Entscheidungskriterien bezogen auf das Hauptziel

Bedeutung (B)	FM1	FM2	FM3	FM4	FM5	FM6	FM7	FM8	FM9	FM10	FM11	FM12	FM13	**Prioritätsvektoren (Gewichtungen)**	**Rang**
FM1	1	2	3	3	1/3	1/7	1/7	1/5	2	1/3	3	2	3	**0.05785**	**7**
FM2	1/2	1	1/2	2	1/3	1/6	1/6	1/3	1/5	1/5	1/2	2	3	**0.02804**	**10**
FM3	1/3	2	1	3	1/2	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3	2	2	4	**0.04144**	**8**
FM4	1/3	1/2	1/3	1	1/5	1/8	1/8	1/5	1/5	1/5	1/2	2	2	**0.02036**	**11**
FM5	3	3	2	5	1	1/3	1/3	3	1/3	3	3	5	7	**0.10159**	**4**
FM6	7	6	5	8	3	1	1/2	3	3	3	5	7	8	**0.18428**	**2**
FM7	7	6	5	8	3	2	1	3	3	2	5	8	8	**0.20406**	**1**
FM8	5	3	3	5	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1/3	3	5	5	**0.07988**	**6**
FM9	1/2	5	3	5	3	1/3	1/3	3	1	3	5	5	7	**0.12346**	**3**
FM10	3	5	3	5	1/3	1/3	1/2	3	1/3	1	3	5	5	**0.09419**	**5**
FM11	1/3	2	1/2	2	1/3	1/5	1/5	1/3	1/5	1/3	1	2	2	**0.03139**	**9**
FM12	1/2	1/2	1/2	1/2	1/5	1/7	1/8	1/5	1/5	1/5	1/2	1	2	**0.01907**	**12**
FM13	1/3	1/3	1/4	1/2	1/7	1/8	1/8	1/5	1/7	1/5	1/2	1/2	1	**0.0144**	**13**
					λ_{max}= 14.4037			**CI = 0.11698**			**CR = 0.07499**				

Tabelle 3: Paarweiser Vergleich von Alternativen bezogen auf das Kriterium „Bedeutung“

Die Konsistenzprüfung (CR = 0,07499 < 0,1) zeigt eine recht gute Konsistenz der subjektiven Beurteilungen bei den paarweisen Vergleichen. Daraus folgt eine relativ gute Verlässlichkeit der Bewertungsmatrix und der berechneten Prioritätsgewichtungen. Weitere Berechnungen betreffen die Prioritäten der angegebenen Fehlerursachen bezogen auf die Bedeutung ihrer Folgen und ihren jeweiligen Beitrag zur Nichterfüllung der Bemessungsanforderungen des Systems (siehe die beiden äußersten rechten Spalten in Tabelle 3). Die Fehlerursachen Bewehrungskorrosion (**FM7**), Risse im Stahlbeton (**FM6**) sowie Unvollständige ermittelte Lasten & fehlerhafte Bemessungen (**FM9**) sind mit Prioritätsgewichtungen von jeweils 0,204, 0,184 und 0,123 die drei dringlichsten Fehlerursachen, deren Folgen die strukturelle Zuverlässigkeit des Systems beeinträchtigen können. Die nachstehenden Tabellen 4 und 5 zeigen jeweils einen Vergleich verschiedener Fehlerursachen hinsichtlich der Auftretens- und der Entdeckungswahrscheinlichkeit.

Auftreten (A)	FM1	FM2	FM3	FM4	FM5	FM6	FM7	FM8	FM9	FM10	FM11	FM12	FM13	**Prioritätsvektoren (Gewichtungen)**	**Rang**
FM1	1	2	3	3	3	1/2	1/2	5	5	8	1/2	1/2	2	**0.09828**	**4**
FM2	1/2	1	3	3	1/3	1/3	3	3	4	6	1/2	1/2	2	**0.08912**	**6**
FM3	1/3	1/3	1	3	2	1/3	1/4	3	3	7	1/3	1/3	2	**0.05993**	**8**
FM4	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1/3	1/3	2	2	2	1/2	1/8	1/3	**0.02945**	**10**
FM5	1/3	3	1/2	3	1	1/3	1/4	4	3	5	1/3	1/3	2	**0.06749**	**7**

FM6	2	3	3	3	3	1	2	6	8	8	3	1/3	3	**0.14795**	**2**
FM7	2	1/3	4	3	4	1/2	1	5	5	8	3	1/2	2	**0.12121**	**3**
FM8	1/5	1/3	1/3	1/2	1/4	1/6	1/5	1	2	2	1/4	1/8	1/3	**0.02131**	**11**
FM9	1/5	1/4	1/3	1/2	1/3	1/8	1/5	1/2	1	3	1/4	1/7	1/3	**0.01967**	**12**
FM10	1/8	1/6	1/7	1/2	1/5	1/8	1/8	1/2	1/3	1	1/7	1/8	1/5	**0.01235**	**13**
FM11	2	2	3	2	3	1/3	1/3	4	4	7	1	1/2	1/2	**0.09191**	**5**
FM12	2	2	3	8	3	3	2	8	7	8	2	1	3	**0.18193**	**1**
FM13	1/2	1/2	1/2	3	1/2	1/3	1/2	3	3	5	2	1/3	1	**0.05941**	**9**
					λ_{max}= 14.4772			**CI = 0.1231**			**CR = 0.07891**				

Tabelle 4: Paarvergleichsmatrix von Alternativen bezogen auf das Kriterium „Auftreten“

Entdeckung (E)	FM1	FM2	FM3	FM4	FM5	FM6	FM7	FM8	FM9	FM10	FM11	FM12	FM13	**Prioritätsvektoren (Gewichtungen)**	**Rang**
FM1	1	3	5	3	1/3	1/3	1/3	3	5	5	3	1/3	1/3	**0.07606**	**6**
FM2	1/3	1	3	3	1/3	1/4	1/3	1/3	3	3	1/3	1/4	1/5	**0.03677**	**9**
FM3	1/5	1/3	1	1/2	1/3	1/6	1/5	1/3	2	1/2	1/5	1/8	1/8	**0.01801**	**12**
FM4	1/3	1/3	2	1	1/3	1/6	1/4	1/3	1/2	3	1/3	1/6	1/8	**0.02307**	**10**
FM5	3	3	3	3	1	1/2	1/2	4	6	8	3	2	1/2	**0.11743**	**4**
FM6	3	4	6	6	2	1	3	4	8	8	3	1/4	1/2	**0.14141**	**3**
FM7	3	3	5	4	2	1/3	1	3	5	8	1/3	1/2	1/2	**0.10125**	**5**
FM8	1/3	3	3	3	1/4	1/4	1/3	1	3	4	2	1/3	1/3	**0.05414**	**8**
FM9	1/5	1/3	1/2	2	1/6	1/8	1/5	1/3	1	2	1/3	1/7	1/8	**0.01937**	**11**
FM10	1/5	1/3	2	1/3	1/8	1/8	1/8	1/4	1/2	1	1/4	1/8	1/8	**0.0151**	**13**
FM11	1/3	3	5	3	1/3	1/3	3	1/5	3	4	1	1/3	1/3	**0.06836**	**7**
FM12	3	4	8	6	1/2	4	2	3	7	8	3	1	1/2	**0.15362**	**2**
FM13	3	5	8	8	2	2	2	3	8	8	3	2	1	**0.17541**	**1**
					λ_{max}= 14.5436			**CI = 0.12863**			**CR = 0.08246**				

Tabelle 5: Paarvergleichsmatrix von Alternativen bezogen auf das Kriterium „Entdeckung“

Die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche in Bezug auf die Kriterien Auftreten und Entdeckung werden in eine reziproke Vergleichsmatrix eingegeben wie in den Tabellen 4 und 5 dargestellt. Für die Kriterien Auftreten und Entdeckung wird ein Konsistenzverhältnis von 0,07891 bzw. 0,08246 geschätzt. Damit kann von einer hinreichenden Konsistenz der Bewertungsmatrizen ausgegangen werden. Es ist jedoch wichtig, darauf hinzuweisen, dass die Fehlerursachen **FM12, FM6, FM7** und **FM1** die größten negativen Auswirkungen auf die strukturelle Zuverlässigkeit von Verkehrswasserbauwerken aus Stahlbeton haben. Die Fehlerursachen **FM13, FM12, FM6, FM5** und **FM7** sind am einfachsten zu entdecken, während die Fehlerursachen **FM10, FM3** und **FM9** am schwierigsten zu entdecken sind und wahrscheinlich erhebliche Auswirkungen auf die strukturelle Zuverlässigkeit des Bauwerks haben.

4.4 Modellsynthese: Aggregation der lokalen Prioritäten zur Ableitung der Gesamtprioritäten der Alternativen in Bezug auf das zu lösende Problem

Zur Bestimmung der endgültigen Prioritäten der verschiedenen Fehlerursachen unter Beachtung des Hauptziels der Fallstudie, nämlich die Klassi-

fizierung von Fehlerursachen im Hinblick auf Instandsetzungsmaßnahmen, müssen die einzelnen Beurteilungen auf der Ebene der Kriterien und Alternativen aggregiert werden. Die verschiedenen Analysen werden zu diesem Zweck in einer Synthese zusammengeführt. Dabei wird jedes Ranking mit der Priorität seines Kriteriums oder untergeordneten Kriteriums multipliziert und die resultierenden Gewichtungen der einzelnen Alternativen addiert, um die endgültigen Prioritäten der 13 Fehlerursachen zu erhalten. Anders ausgedrückt: Zur Aggregation der Prioritäten der 13 Fehlerursachen wird durch Berechnung des arithmetischen Mittels nach Forman und Peniwati (1998) eine Aggregationsmatrix erstellt (siehe Tabelle 6 unten).

	Bedeutung (B)	Auftreten (A)	Entdeckung (E)	Globale Prioritäts-gewichte	Rang
Kriterien Prioritätsgewichte (KW)	**0.6479**	**0.2299**	**0.1222**		
Frost-Tausalzangriff oder Frost-Tauwechsel **(FM1)**	0.05785	0.09828	0.07606	**0.069**	**6**
lösender & treibender Angriff (z.B. AAR, etc.) **(FM2)**	0.02804	0.08912	0.03677	**0.043**	**11**
Temperaturschwankungen **(FM3)**	0.04144	0.05993	0.01801	**0.043**	**12**
Durchfeuchtungen von Bauteilen **(FM4)**	0.02036	0.02945	0.02307	**0.023**	**13**
Konstruktionsmängel **(FM5)**	0.010159	0.06749	0.11743	**0.096**	**3**
Rissbildung **(FM6)**	0.18428	0.14795	0.14141	**0.171**	**2**
Schaden an der Bewehrung (freiliegend, gerissen, etc.) **(FM7)**	0.20406	0.12121	0.10125	**0.172**	**1**
übermäßige Verformungen bzw. un-/gleichmäßige Setzungen **(FM8)**	0.07988	0.02131	0.05414	**0.063**	**8**
Unvollständige ermittelte Lasten & fehlerhafte Bemessungen **(FM9)**	0.12346	0.01967	0.01937	**0.087**	**4**
Ermüdungsversagen **(FM10)**	0.09419	0.01235	0.0151	**0.066**	**7**
konstruktiver Mangel an Horizontal- und Vertikalabdichtung **(FM11)**	0.03139	0.09191	0.06836	**0.05**	**9**
schadhafte Betonoberfläche mit Feuchtigkeitsaustritt **(FM12)**	0.01907	0.18193	0.15362	**0.073**	**5**
mechanische Beanspruchung (Schiffsanprall, Verschmutzung, etc.) **(FM13)**	0.0144	0.05941	0.17541	**0.044**	**10**
	Gesamt-CR der Hierarchie = 0.05849				

Tabelle 6: Synthese der Modellprioritäten

Das Gesamtkonsistenzverhältnis (CR) von etwa 0,05849 < 0,1 zeigt eine hinreichend zufriedenstellende Korrektheit und Konsistenz der durchgeführten paarweisen Vergleiche. Auf der Grundlage der berechneten aggregierten/kombinierten Prioritätsgewichtungen werden die verschiedenen Alternativen (Fehlerursachen) entsprechend ihrer Gewichtungswerte sortiert (siehe Tabelle 6). Die Analyse der Prioritätsgewichtungen zeigt, dass die Verfallsprozesse Risse im Stahlbeton und Bewehrungskorrosion die wichtigsten Verfallsprozesse sind, die wahrscheinlich dazu führen, dass Verkehrswasserbauwerke die strukturellen Anforderungen nicht mehr erfüllen. Ein weiteres Ergebnis der Analyse zeigt, dass in der Planungs- und Konstruktionsphase auch Baumängel in Verbindung mit Betongüte und Bemessungsverfahren großer Aufmerksamkeit bedürfen, wenn weitere Auswirkungen auf die strukturelle Zuverlässigkeit von Anlagen ausgeschlossen werden sollen.

4.5 Sensitivitätsanalyse

Die Frage der Sensitivität der Ergebnisse ist in vielen Bereichen, in denen die Prozess- oder Systemoptimierung immer wieder ein wichtiges Thema ist, von zentraler Bedeutung. Entscheidungsverantwortliche können mithilfe von Sensitivitätsanalysen die Glaubwürdigkeit ihres analytischen Modells steigern, denn sie liefern passende Antworten auf „Was-wäre-wenn"-Fragen und ermöglichen eine quantitative Bestimmung der Robustheit der optimalen Lösung gegenüber veränderten Problemparametern (Erkut und Tarimcilar, 1991). Mit der Sensitivitätsanalyse kann konkret geprüft werden, ob kleinere Verschiebungen bei den Beurteilungen zu signifikanten Veränderungen der gesamten Prioritätsrangfolge führen und wie empfindlich die Alternativen auf geänderte Prioritäten der Kriterien reagieren, die der Ebene des Hauptziels unmittelbar untergeordnet sind.

Konkret bedeutet dies, dass sich die Gesamtrangfolge der Alternativen mit Verschiebungen bei der Bewertungslogik der Analysten verändern wird, obwohl die Kriterienbewertung eindeutig „Bedeutung" als wichtigstes Kriterium (siehe Tabelle 2) zur Klassifizierung der Fehlerursachen ergeben hat. Grundsätzlich weist jedes Kriterium ein erhebliches Maß an Sensitivität auf, die über das gesamte Gewichtungsspektrum zu einer erheblichen Modifizierung der Rangfolge der Alternativen führen kann (Erkut und Tarimcilar, 1991). Die Unempfindlichkeit der aktuellen Lösung gegenüber möglichen Verschiebungen kann in mehreren seriellen Sensitivitätsanalysen untersucht werden, bei denen jeweils Prioritätsgewichtungen (relative Wichtigkeit) der einzelnen Kriterien geändert werden. Es sei darauf hingewiesen, dass die in diesem Beitrag vorgeschlagene Sensitivitätsanalyse nur für die Prioritäten der drei in der Studie ausgewählten Kriterien relevant ist. Mit den vorgegeben Fragen werden darüber hinaus verschiedene Szenarien simuliert:

- Welche Veränderungen ergeben sich, wenn alle Kriterien dieselbe Prioritätsgewichtung erhalten?
- Welche Alternative wird als beste Alternative ermittelt, wenn die Wichtigkeit eines einzelnen Kriteriums geändert wird?

Wie von Bevilacqua und Braglia (2000) empfohlen, sollen bei der Analyse des Einflusses eines geänderten Kriteriums auf die Gesamtrangfolge der Alternativen nur die „wichtigsten Auswirkungen" berücksichtigt werden. Daher bleiben „Interaktionseffekte" von Änderungen an den anderen beiden Gewichtungen unberücksichtigt. Diese Vereinfachung erfolgt in Anlehnung an Bevilacqua und Braglia (2000), die der Ansicht sind, dass eine Sensitivität der endgültigen Lösung vor allem gegenüber den Änderungen besteht, welche die Prioritäten auf der höchsten Hierarchieebene betreffen. Bei der Analyse wird ferner davon ausgegangen, dass der AHP als Entscheidungsverfahren Anwendung findet und das Ziel der Entscheidungsverantwortlichen lediglich die Klassifizierung der verschiedenen Alternativen ist. Daher ist hier vor allem die Sensitivität der Alternative mit dem höchsten Ranking von Interesse.

4.5.1 Zuweisung derselben Prioritätsgewichtung zu den drei Kriterien

Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse. Sie basieren auf der Annahme, dass die drei Kriterien dieselbe relative Wichtigkeit haben und ihnen dieselbe Prioritätsgewichtung von 1/3 zugewiesen wurde. Dadurch verringert sich auch die relative Wichtigkeit des Kriteriums Bedeutung um 50 %. Es zeigt sich außerdem, dass die erheblich veränderten Gewichtungswerte des ersten Kriteriums zu einer starken Veränderung der Gesamtprioritätsgewichtungen führen und auch das endgültige Ranking mehrerer Alternativen (**FM8, FM10, FM12 und FM13**) beeinflussen. Darüber hinaus verändert sich die ursprüngliche Rangfolge der Alternativen, sodass nun Risse im Stahlbeton sowie Bewehrungskorrosion die relevanten Fehlerursachen sind. Schließlich lässt sich auch eine Verschiebung um ca. 17 % zwischen der ursprünglichen Prioritätsgewichtung der Schadensart **FM7** (0,172) und dem aktuellen Wert 0,1422 ablesen.

	Bedeutung **(B)**	Auftreten **(A)**	Entdeckung/ Erhaltung **(E)**	**Prioritäts-gewichte**	**Rang**
KW	**0.3333**	**0.3333**	**0.3333**		
FM1	0.0579	0.0983	0.0761	**0.0774**	**6**
FM2	0.0280	0.0891	0.0368	**0.0513**	**10**
FM3	0.0414	0.0600	0.0180	**0.0398**	**12**
FM4	0.0204	0.0295	0.0231	**0.0243**	**13**
FM5	0.0102	0.0675	0.1174	**0.0955**	**4**
FM6	0.1843	0.1480	0.1414	**0.1579**	**1**
FM7	0.2041	0.1212	0.1013	**0.1422**	**2**
FM8	0.0799	0.0213	0.0541	**0.0518**	**9**
FM9	0.1235	0.0197	0.0194	**0.0542**	**8**
FM10	0.0942	0.0124	0.0151	**0.0405**	**11**
FM11	0.0314	0.0920	0.0684	**0.0639**	**7**
FM12	0.0191	0.1820	0.1536	**0.1182**	**3**
FM13	0.0144	0.0594	0.1754	**0.0831**	**5**

Tabelle 7: Szenario 1: Drei Kriterien mit derselben Prioritätsgewichtung

4.5.2 Zuweisung unterschiedlicher Prioritäts-gewichtungen zu den drei Kriterien

In der nachstehenden Tabelle 8 wird das Ergebnis des nächsten Sensitivitätstests gezeigt, bei dem die ursprüngliche Prioritätsgewichtung der Bedeutung um etwa 25 % auf einen Wert von 0,4859 verringert wurde. Daraus ergibt sich für die Gesamtprioritäts-gewichtungen der einzelnen Fehlerursachen eine Verschiebung von etwa 5 bis 8 % gegenüber den ursprünglichen Werten. Wichtiger noch ist, dass der Rang verschiedener Fehlerursachen (**FM2, FM3, FM4, FM5** und **FM11**) von der Änderung der ursprünglichen Gewichtung unberührt bleibt. Die Fehlerursachen Risse im Stahlbeton, Schäden an den Stahlbewehrungen und bauliche Mängel in Verbindung mit Betongüte und Bemessungsverfahren sind weiterhin die Fehlerursachen, die in Bezug auf Instandsetzungsmaßnahmen zu priorisieren sind.

	Bedeutung **(B)**	Auftreten **(A)**	Entdeckung/ Erhaltung **(E)**	**Prioritäts-gewichte**	**Rang**
KW	**0.4859**	**0.257**	**0.257**		
FM1	0.0579	0.0983	0.0761	**0.0729**	**5**
FM2	0.0280	0.0891	0.0368	**0.046**	**11**
FM3	0.0414	0.0600	0.0180	**0.0402**	**12**
FM4	0.0204	0.0295	0.0231	**0.0234**	**13**
FM5	0.0102	0.0675	0.1174	**0.0969**	**3**
FM6	0.1843	0.1480	0.1414	**0.1639**	**1**
FM7	0.2041	0.1212	0.1013	**0.1563**	**2**

FM8	0.0799	0.0213	0.0541	**0.0582**	**8**
FM9	0.1235	0.0197	0.0194	**0.070**	**6**
FM10	0.0942	0.0124	0.0151	**0.0528**	**10**
FM11	0.0314	0.0920	0.0684	**0.0564**	**9**
FM12	0.0191	0.1820	0.1536	**0.0955**	**4**
FM13	0.0144	0.0594	0.1754	**0.0674**	**7**

Tabelle 8: Unterschiedliche Prioritätsgewichtungen der drei Kriterien

Aus der Sensitivitätsanalyse wird deutlich, dass nur erhebliche Änderungen der Gewichtungen des Kriteriums Bedeutung zu einer Verschiebung der Prioritäten der Fehlerursachen führen. Jedoch ergibt sich durch die Reduzierung der Gewichtung des Hauptkriteriums Bedeutung um 25 % ein Wechsel beim Spitzenplatz in der endgültigen Rangfolge der Alternativen. Diese Ergebnisse belegen eine inhärente Robustheit der mit dem AHP entwickelten endgültigen Prioritätsgewichtungen, selbst unter Berücksichtigung der Sensitivität der Rangfolge der Alternativen gegenüber veränderten Kritieriengewichtungen auf der zweiten Ebene der Entscheidungshierarchie.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

In diesem Beitrag wird eine Methode zum Ranking von Fehlerursachen vorgestellt. Die Methode ermöglicht die Auswahl der wichtigsten Fehlerursachen, deren Auswirkungen auf die strukturelle Zuverlässigkeit eines Bauwerks eine Instandsetzung besonders dringlich machen. Vor dem Hintergrund des überalterten Bauwerksbestands an den Bundeswasserstraßen und der verschiedenen auftretenden Schädigungsmechanismen erhält das Risiko eines Infrastrukturversagens zunehmende Bedeutung. Daher ist ein rationaler Entscheidungsprozess, der sich auf Kennzahlen zur Beschreibung der strukturellen Zuverlässigkeit von Bauwerken stützt, zwingend erforderlich. Von diesem profitieren auch die für die Infrastrukturerhaltung zuständigen Fachleute, die bei ihren regelmäßigen Sichtprüfungen häufig entscheiden müssen, welche Schäden die strukturelle Zuverlässigkeit der Bauwerke besonders gefährden. Methoden der Risikobewertung spielen eine wichtige Rolle in Entscheidungsfindungsprozessen, denn mit ihren Verfahren können die aktuellen Schädigungsmechanismen systematisch identifiziert, analysiert, bewertet und mögliche Folgen, bis hin zum vollständigen Versagen des Bauwerks, minimiert werden. Mithilfe des primär von Saaty (1990) entwickelten analytischen Hierarchieprozesses werden aus verschiedenen, in einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) ermittelten Kriterien Prioritätsgewichtungen abgeleitet, mit denen sich die Fehlerursachen in eine Rangfolge bringen lassen. Dabei können Unsicherheiten, die mit der Subjektivität von Expertenwissen einhergehen, ebenfalls berücksichtigt werden. Im Vergleich zu anderen traditionellen Methoden zur Lösung des MCDM-Problems gelangt die hier vorgeschlagene Methode aufgrund der Vermeidung subjektiver Einflüsse auf die Prioritätsgewichtungen nicht nur zu einer objektiveren Bewertung multikriterieller Entscheidungsprobleme, sondern dient gleichzeitig als Werkzeug für qualitative und quantitative Analysen der verfügbaren Daten. Die Prioritätsgewichtungen der verschiedenen, aus dem FMEA-AHP-Modell gewonnenen Fehlerursachen werden in Tabelle 8 in der folgenden Rangfolge dargestellt: **FM6 > FM7 > FM5 > FM12 > FM1 > FM9 > FM13 > FM8 > FM11 > FM10 > FM2 > FM3 > FM4**. In dieser Studie werden darüber hinaus vier wesentliche Kategorien von Fehlerursachen ermittelt (siehe Abbildung 5). Zur ersten Kategorie gehören die Fehlerursachen **FM1, FM2, FM3** und **FM4**. Sie haben eine verhältnismäßig geringe Auftretenswahrscheinlichkeit, sind einfach zu erkennen und haben, zumindest unmittelbar, keine weiteren Folgen für die strukturelle Zuverlässigkeit der Anlage. Ihre Langzeitfolgen können sich dennoch negativ auf die Dauerhaftigkeit einer Anlage auswirken.

In der zweiten Kategorie befinden sich die Fehlerursachen mit einer sehr hohen Auftretenswahrscheinlichkeit, die wahrscheinlich einfach zu entdecken sind und schwerwiegende und inakzeptable Folgen für die strukturelle Zuverlässigkeit der Anlage haben können. Zu dieser Kategorie gehören die Fehlerursachen FM5, FM6 und FM7. Da sie die Tragfähigkeit des Bauwerks gefährden und dringend Maßnahmen bedürfen, stellen sie die größten Anforderungen an die entsprechenden Fachleute für Instandsetzungsmaßnahmen. Die dritte Kategorie umfasst lediglich die Fehlerursachen FM8, FM9 und FM10 mit einer sehr geringen Auftretenswahrscheinlichkeit. Diese sind häufig nur sehr schwer zu entdecken und haben nachteilige Auswirkungen auf die strukturelle Zuverlässigkeit des Systems. Die Fehlerursachen der vierten Kategorie, FM11, FM12 und FM13, haben eine sehr hohe Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit und relativ geringfügige Folgen.

Ihre Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit der Infrastruktur sind wahrscheinlich eher langfristiger Art. Betrachtet man die Kategorien unter dem Aspekt des Zusammenwirkens verschiedener Fehlerursachen, so ist herauszustellen, dass die kombinierten Langzeitfolgen der Fehlerursachen aus der ersten und vierten Kategorie unweigerlich zum Verlust der strukturellen Zuverlässigkeit der Infrastruktur führen können. So können beispielsweise Horizontal- oder Vertikalabdichtungen in einer bereits durch Konstruktionsmängel geschwächten Anlage zu übermäßigen Verformungen/Setzungsdifferenzen führen.

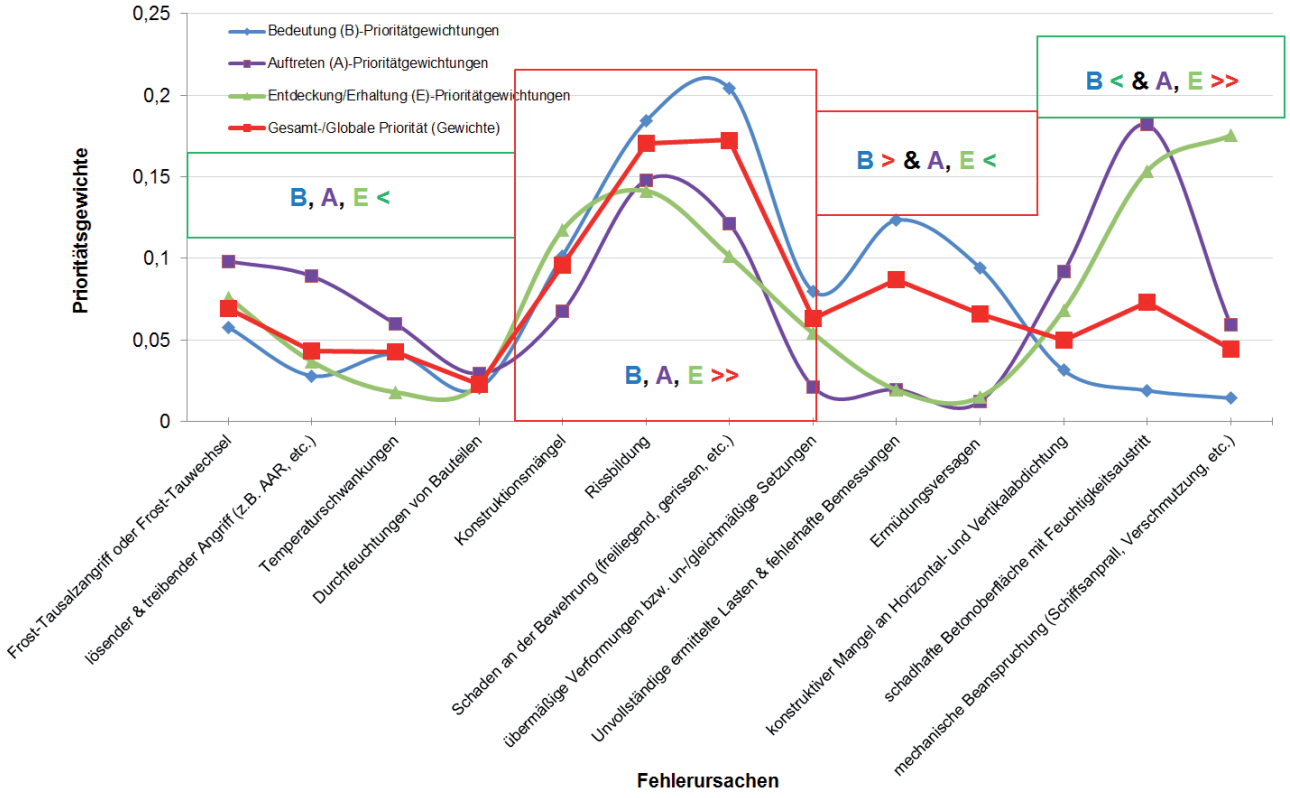


Abbildung 5: Berechnung von Prioritätsgewichten verschiedener Fehlerursachen

Der hier vorgestellte Ansatz weist einige Beschränkungen auf, die erwähnt werden müssen. So ist der Ansatz weitgehend von Expertenwissen und Schadensdaten abhängig, was zu beträchtlichen Unsicherheiten führt. Darüber hinaus gilt die AHP-Methode aufgrund der hohen Zahl der für ihre Ausführung erforderlichen Clustermatrizen als zeitaufwändig und somit teuer. Mit dem Ansatz wird jedoch versucht, eine Lücke zu schließen, die sich in der Praxis immer wieder zeigt: Der strukturierte Analyserahmen kann zur Klassifizierung und Auswahl verschiedener Fehlerursachen im Hinblick auf nötige Instandsetzungsmaßnahmen dienen. Darüber hinaus wird dieses Auswahlmodell verwendet, um das Entscheidungsfindungsprozess zu strukturieren. Das auf dem analytischen Hierarchieprozess basierende alternative Risikobewertungsmodell ist ein Hilfsmittel zur Priorisierung der Risikoprioritätszahl (RPZ) für jede bewertete Schadensart und ermöglicht die Identifizierung der kritischsten Fehlerursachen im System. Dieser Aspekt kann letztlich als Unterstützung von Investitionsentscheidungen im Hinblick auf die Verbesserung der Zuverlässigkeit des gesamten Systems dienen. Die hier ermittelten Ergebnisse zeigen generell, dass die Bedeutung möglicher Fehlerfolgen das wichtigste Kriterium zur Identifizierung des Schadens mit dem höchsten Risiko und damit dem dringendsten Instandsetzungsbedarf ist.

Um die sprachliche Unschärfe bei der Entwicklung unserer Vergleichsmatrizen zur Ableitung präziser Prioritätsgewichtungen vollständig erfassen zu können, kann in zukünftigen Studien ein Fuzzy-AHP verwendet werden. Zusätzlich kann die Technik TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) zur Bewertung und Klassifizierung verschiedener Fehlerursachen eingesetzt werden. Zukünftige Arbeiten könnten sich auf die Entwicklung qualitativer und quantitativer Ansätze konzentrieren und zur Untersuchung des Versagensrisikos einer Infrastrukturanlage auch Methoden des Multi-Criteria Decision Making (MCDM) verwenden (Schmidt-Bäumler, 2017). Ein erster Schritt könnte der von Bowles & Peláez (1995) in ihrer Studie vorgeschlagene Fuzzy-Logik-Ansatz sein, mit

dem sich auch unklar, mehrdeutige, qualitative oder unpräzise Informationen für die Priorisierung von Fehlerursachen im Hinblick auf Korrekturmaßnahmen verarbeiten lassen. Mit den Ergebnissen solcher Forschungsprojekte können Aussagekraft und Schlüssigkeit der aktuellen Zustandsnoten optimiert und die Entscheidungsfindung zur Priorisierung von Instandsetzungsmaßnahmen verbessert werden.

Danksagung

Die Autoren danken dem durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) initiierte BMVI-Expertennetzwerk für die Finanzierung und Unterstützung dieser Arbeit.

6. Literatur

Bertolini, M., Bevilacqua, M., Braglia, M., and M., Frosolini. (2004). An analytical method for maintenance outsourcing service selection. *International Journal of Quality & Reliability* 21 (7): 772 –788.

Bevilacqua, M., and M., Braglia. (2000). the analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering & System Safety* 70: 71 – 83.

Bhushan, N., and K., Rai. (2004). Strategic Decision making: Applying the analytic hierarchy process. Springer, Berlin, 11 – 21.

Bowles, J. B. (2004). An assessment of RPN prioritization in a failure modes effects and criticality analysis. *Journal of the IEST* 47: 51 – 56.

Bowles, J. B. & Peláez, E. C. (1995). Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. *Reliability Engineering & System Safety* 50 (2): 203 – 213.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). 2009. VV-WSV 2101-Bauwerksinspektion, Einführungserlass: WS 13/5257.15/4 vom 27.02.2009.

Erkut, E. and M. Tarimcilar. (1991). On sensitivity analysis in the analytic hierarchy process. IMA *Journal of Mathematics Applied in Business & Industry* 3: 61 – 83.

Forman, E. and K. Peniwati. 1998 untersucht. Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 108 (1): 165 – 169.

Gilchrist, W. (1993). Modelling failure modes and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability* 10 (5): 16 – 23.

Lui, H. C., You, J. X., Ding, X. F., & Su, Q. (2015). Improving risk evaluation in FMEA with a hybrid multiple criteria decision making method. *International Journal of Quality & Reliability* 32 (7): 763 – 782.

Panenka, A., Nyobeu, F. (2018b). Condition assessment based on results of qualitative risk analyses. Proceedings of the Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering of the International Association for Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE), Ghent, 28 -31 October 2018; not yet published

Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process - What is it and how it is used. *Mathl Modelling* 9 (3-5): 161 – 176.

Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research* 48 (1990): 9 – 26.

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal Services Sciences* 1(1): 83 – 98.

Schmidt-Bäumler, H. (2017). Risk-based maintenance management system for waterway infrastructures in Germany. In Bakker, J. et al. (ed.) *Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure*: 559 – 566. London: Taylor & Francis Group

Wang, Y. M., Chin, K. S., Poon, G. K. K., & Yang, J. B. (2009). Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. *Expert Systems with Applications* 36 (2009): 1195 – 1207.

Rang-E - Innovationen auf der letzten Meile im Bahnverkehr - Autonomes Rangieren auf der Bremischen Hafeneisenbahn[1]

von Dr. Iven Krämer

Der PIANC Kongress 2018 in Panama stand unter dem Motto der engeren Verbindung globaler maritimer Hubs *(„Connecting Global Maritime Hubs")*, was einen wesentlichen Teil der Zukunftsentwicklung der Häfen umfasst. Ebenso dazugehörig ist aber auch die Verbindung der maritimen Hubs mit dem Hinterland, denn diese garantiert letztlich die Schnittstellenfunktion der Häfen als Knotenpunkte globaler maritimer Supply Chains. In diesem Kontext stellt der Beitrag zu „*SHUNT-E 4.0 - Autonomous zero emission shunting processes in port and hinterland railway operations*" (deutsch: *Rang-E - Autonomes Rangieren auf der Hafenbahn*) eine logistisch notwendige Ergänzung der überwiegend wasser- und strombaulichen Aspekte dar. Am Beispiel eines Innovationsprojektes zum autonomen Rangieren auf der Bremischen Hafeneisenbahn wird aufgezeigt, dass die Leistungsfähigkeit von Häfen im stetig wachsenden Wettbewerb heute mehr denn je von deren Anbindungen an das Hinterland bestimmt wird.

Ein wesentlicher Teil der europäischen Schienengüterverkehre hat seinen Ursprung bzw. sein Ziel in einem See- oder Binnenhafen. Für Deutschland bedeutet dies, dass nahezu ein Drittel aller Güterzüge von oder zu den deutschen Seehäfen unterwegs ist. Unseren Häfen kommt damit für das System Schiene und die hier dringend erforderliche Innovationsorientierung eine deutlich größere Gestaltungsrolle zu, als die der reinen Schnittstelle von See- und Landtransporten und insbesondere die Häfen mit eigener Bahn-Infrastruktur stehen hier in besonderer Verantwortung. Insofern besteht die Zielrichtung der Bremischen Hafeneisenbahn, die im Container-Hinterlandtransport mit jährlich mehr als einer Million TEU und nahezu 50 Prozent Bahnanteil bereits heute einen europaweit führenden Wert im Modal-Split aufweist, darin, die Möglichkeiten der Digitalisierung umfassend aufzugreifen. Ein wesentlicher Schritt dafür wird ein modernes und transparentes IT System sein, das die im Markt vorherrschende Meinung, dass Häfen aus bahnbetrieblich-operativer Sicht undurchschaubar seien, vollständig auflösen wird.

Und ein weiterer für den gesamten Bahnsektor wesentlicher Schritt liegt in der Optimierung und stufenweisen Automatisierung der bahnbetrieblichen Prozesse auf der letzten Meile bis hin zur Gestaltung vollständig autonomer Rangierprozesse. Hierfür wurde gemeinsam mit mehreren Partnern aus der Hafen-Industrie (Container-Terminalbetreiber Eurogate, Automobil-Terminalbetreiber BLG, Eisenbahnverkehrs- und Rangierunternehmen DB Cargo, Eisenbahnverkehrs- und Rangierunternehmen evb), dem Verband deutscher Verkehrsunternehmen VDV und verschiedenen Forschungseinrichtungen (Institut für Seeverkehrswirtschaft und Logistik (ISL) Bremen, Institut IVE der TU Braunschweig, Institut für Produktion und Logistik BIBA aus Bremen) das Projekt Rang-E initiiert, das seit 2017 vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur im Rahmen des Programms zur Förderung Innovativer Hafentechnologien (IHATEC) unterstützt wird. Die grundlegenden Überlegungen für einen autonomen Rangierbetrieb werden nachfolgend skizziert.

Die Ausgangslage – „*Seit Jahrzehnten bewährter Bahnbetrieb*"

Allgemein bekannt und zugleich erschreckend ist, dass der Bahntransport trotz seiner positiven Umweltwirkung über die vergangenen Jahrzehnte vergleichsweise wenig innovationsorientiert war. Deutlich wird dies aus der Hafenperspektive darin, dass ein Seeschiff mit einer Transportkapazität von heute bis zu 22.000 Containern nur wenige Minuten nach dem Anlegen im Hafen bereits be- und entladen wird. Ähnlich verhält es sich im Hinterlandverkehr mit LKW oder auch mit dem Binnenschiff. In diesen Fällen sind die hafenbetrieblich-logistischen Prozesse grundsätzlich so gestaltet, dass zwischen der Ankunft im Terminal und der Be- und Entladung der Waren keine Leerläufe und unnötige Wartezeiten entstehen. Um dies zu ermöglichen, erfolgte maßgeblich getrieben durch die Terminalbetreiber kontinuierlich eine Anpassung von Technologien und Prozessen. Anders verhält es sich leider im Bahnverkehr, denn hier wird auf einen „*seit Jahrzehnten bewährten Bahnbetrieb*" gesetzt. Konkret bedeutet dies, dass nach der Einfahrt eines Zuges in das Hafengebiet bzw. analog dazu auch in ein Inlandterminal zunächst die Streckenlok vom Zug getrennt wird. Danach erfolgt der Transport der Züge bzw. Waggons per Rangierlok zu den Terminals, in denen zunächst Kontrollarbeiten am Zug und an der Ladung erforderlich werden.

In der Konsequenz erfolgen die ersten Ladungsbewegungen an einem Güterzug erst Stunden nach der Ankunft im Hafengebiet. Ähnlich verhält es sich nach Abschluss der Ladearbeiten. Züge mit Importwaren benötigen durch die vorgeschriebenen

1 Dieser Beitrag für die PIANC Deutschland basiert auf einer eigenen, gleichlautenden Veröffentlichung in der Zeitschrift Internationales Verkehrswesen, 69. Jahrgang, Heft 2, April 2017, S. 26-27. Trialog Publishers Verlagsgesellschaft in München. Er wurde entsprechend aktualisiert.

Bremsproben, durch Ladungskontrollen und Rangierarbeiten im Mittel etwa zwei Stunden, bevor sie das Hafengebiet zu ihren Zielorten im europäischen und im nationalen Güterverkehr verlassen können. Das bedeutet, dass die Schiene im Operation auf der letzten Meile deutlich benachteiligt ist und dies in erster Linie durch bahnbetriebliche Regelungen und Vorschriften. Im kombinierten Verkehr auf den europäischen Güterverkehrskorridoren ließe sich folglich allein durch eine Optimierung des Bahnbetriebs auf der letzten Meile mindestens 20 Prozent Produktivitätssteigerung erzielen.
Der Handlungsbedarf ist offenkundig und es erscheint geradezu fahrlässig, dass viele der bisherigen Bahn-Innovationsvorstöße erfolglos geblieben sind. So sind automatische Kupplungen, automatische Bremsproben, Fernsteuerungen von Zügen, automatisierte Ladungskontrollen, Hindernisdetektionen und viele weitere bahntechnische Optimierungen längst technisch möglich bzw. erprobt. Sie konnten sich, von Einzellösungen abgesehen, am Markt bislang aber u.a. wegen aufwändiger Zulassungsprozesse nicht etablieren, so dass die Schiene ohne eine klare Hinwendung zu technischen Innovationen und digitalen Prozessoptimierungen im Verkehrsträgervergleich weiter zurückzufallen droht.

Beispiel Hafenbahnbetrieb in Bremerhaven

Das diskriminierungsfrei zugängliche Hafen-Eisenbahnnetz in Bremerhaven ist Teil des öffentlichen Infrastrukturunternehmens Bremische Hafeneisenbahn. Es gehört zur Freien Hansestadt Bremen, die sich mit ihren betrieblichen und technischen Dienstleistern um die Infrastruktur kümmert. Auf den Gleisen der Bremischen Hafeneisenbahn verkehren inzwischen regelmäßig über 30 europäische Eisenbahnverkehrsunternehmen und weitere 50 verfügen über entsprechende Nutzungsverträge. Diese Unternehmen verbinden die Bremischen Häfen mit den Zielen und Ursprungsorten im nationalen und europäischen Hinterlandverkehr.

Zum Status quo übernehmen mehrere im Wettbewerb zueinander stehende Rangierdienstleister die Aufgabe, die Züge bzw. Waggons, die in Bremerhaven vorwiegend mit Automobilen und Containern beladen sind, von den Einfahrtsgleisen zu den Umschlagterminals und umgekehrt zu transportieren. Sie übernehmen diese Dienstleistung im Auftrag der jeweiligen Eisenbahnverkehrsunternehmen, die wiederum dafür Sorge tragen, dass die elektrisch betriebenen Streckenlokomotiven mit den jeweiligen Lokführern für die Ein- und Ausfahrt aus dem Hafengebiet rechtzeitig zur Verfügung stehen. Aktuell werden am Standort Bremerhaven an 360 Tagen des Jahres im 24/7-System insgesamt 13 Rangierlokomotiven unterschiedlicher Bauart und unterschiedlichen Alters, vollständig auf Dieselbasis betrieben.
Zum Betrieb einer Rangierlok sind jeweils der Lokführer und ein Rangiermitarbeiter notwendig. Die Einsatzplanung erfolgt über die ebenfalls vor Ort mit Büroarbeitsplätzen ansässigen Disponenten der entsprechenden Rangierunternehmen. Der eigentliche Fahr- und Rangierbetrieb erfolgt nach den Vorgaben der Betriebsführung der Bremischen Hafeneisenbahn, wobei die dortigen Disponenten die entsprechende Gleisnutzung vorgeben und die Fahrdienstleister auf den Stellwerken die Fahrtstrecken festlegen und freigeben. Als weitere wesentliche Beteiligte an den Hafeneisenbahnprozessen sind die Umschlagbetriebe bzw. Terminals zu nennen, da diese mit dem Beladen und Löschen der Waggons letztlich den Gesamttakt für die Zugbewegungen definieren.
Grundsätzlich folgen in Bremerhaven die Lade-und Löschprozesse sowohl im Container- als auch im Automobilverkehr zuvor definierten Slotzeiten. Die tatsächlichen Abläufe berücksichtigen darüber hinaus die jeweiligen Ladezustände der Waggons, so dass möglichst keine Leerläufe und Wartezeiten entstehen. Eine unmittelbare vertragliche Beziehung zwischen den Terminals, der Hafenbahn-Betriebsführung und den Rangierdienstleistern besteht bislang jedoch nicht, so dass der Kommunikation und Abstimmung der Beteiligten untereinander eine besondere Rolle zukommt. Im Zuge dieser Kommunikation wurde und wird auch gemeinsam über weitergehende Optimierungen des Bahnbetriebes nachgedacht und es wurde sich auf die langfristige Zielrichtung eines autonomen Rangierbetriebes verständigt, z.B. auch, um dem wachsenden Nachwuchsproblem von Lokführern Rechnung zu tragen.

Zielstellung des autonomen Rangierbetriebes (Rang-E 4.0)

Ein vollständig autonomer Rangierbetrieb ist als eine eher langfristige Perspektive zu bewerten, der zunächst verschiedenste Zwischenschritte der Prozessautomatisierung und auch die Schaffung entsprechender infrastruktureller und rechtlicher Voraussetzungen vorausgehen müssen. Ein maßgeblicher Zwischenschritt dazu wird die Einführung eines vollständig und zentral ferngesteuerten Rangierbetriebes sein, der bei einem aktiven Engagement aller am Bahnprozess Beteiligten bereits im kommenden Jahrzehnt nicht nur in Bremerhaven möglich ist.
Die grundlegende Überlegung des Projektes „*Shunt-E 4.0 - Autonomous zero emission shunting processes in port and hinterland railway operations*“ besteht darin, den Gesamtprozess des Hafeneisenbahn-Rangierbetriebes autonom zu gestalten. Im

Ergebnis dessen werden deutlich weniger Lokomotiven als bisher am Standort zum Einsatz kommen. Die elektrisch betriebenen autonomen Rangierlokomotiven *Rang-E 4.0* werden die heute auf Grund mangelnder Abstimmung und Optimierung üblichen Leerfahrten nahezu vollständig vermeiden. Sie werden die Fahrtaufträge aufgrund einer vollständigen Vernetzung bzw. optimierten IT-Schnittstellen mit den Terminalbetrieben und mit der Hafeneisenbahn-Betriebsführung sowie gegebenenfalls auch mit der DB Netz AG und den Eisenbahnverkehrsunternehmen stets vorausschauend und kapazitätsoptimiert durchführen und so zu einer massiven Prozessoptimierung im Schienengüterverkehr beitragen. Konzepte aus aktuellen Innovationsfeldern wie Industrie 4.0, Internet der Dinge, Digitalisierung im Hafen und Selbststeuerung logistischer Einheiten finden hier ein spannendes praxisbezogenes Anwendungsfeld.
Um diese Zielstellungen zu erreichen muss eine selbständig agierende Rangierlokomotive Rang-E 4.0 über sämtliche Statusinformationen der relevanten Eisenbahninfrastrukturunternehmen wie der Bremischen Hafeneisenbahn, der Hafen-Terminals aber natürlich auch der DB Netz AG verfügen, so dass sie stets einen vollständigen Überblick über die betriebliche Situation zum Status quo hat. Zugleich muss über standardisierte IT-Schnittstellen ein kontinuierlicher Zugriff auf Informationen zu den jeweiligen Systemzuständen mit Planungen und Störungen, zu den Lade- und Löschzeiten in den Terminals, zu geplanten Slots, zu den tatsächlichen An- und Abfahrtzeiten der Züge, zur Verfügbarkeit der Lokführer etc. gesichert werden. Auf Basis dessen ist die autonom operierende Rangierlokomotive Rang-E 4.0 in der Lage, stets zu wissen, welche Rangieraufträge als nächstes, übernächstes und überübernächstes zu erledigen sind, wodurch sich automatisch eine optimierte Nutzung von Fahrstraßen und eine optimierte Belegung von Gleisen (Infrastrukturoptimierung) ergibt. Eine entsprechend smarte Rangierlok wird sich bzgl. der Aufträge mit den anderen Rangierlokomotiven gleicher Art abstimmen (z.B. im Sinne einer Auktion, wie sie zur Optimierung in selbststeuernden Systemen bereits eingesetzt wird), die notwendige Infrastruktur buchen und sie wird im Störungsfall in der Lage sein, diese weitgehend selbstständig im Verbund mit ihren „Kolleginnen“ aufzulösen.

Im Vergleich zu den heute üblichen bahnbetrieblichen Abläufen im Hafengebiet benötigt Rang-E keine Pausen und natürlich wird sie dank eines Batteriebetriebes emissionsfrei die Transportleistungen auf der letzten Meile im Hafengebiet erbringen.
Selbstverständlich ist aber auch davon auszugehen, dass vor der Einführung eines solchen autonomen Rangierbetriebes auf der Bremischen Hafeneisenbahn eine Vielzahl betrieblicher, eisenbahnrechtlicher, unternehmerischer, finanzieller und organisatorischer Fragen zu klären ist. Genau dazu dient dieses Projekt.

Das Gebot der Stunde

Wie bereits dargestellt, ist die Zielstellung eines vollständig autonom betriebenen Rangierbetriebes auf einer der bedeutendsten europäischen Hafeneisenbahnen (noch) eher symbolischer Natur, aber dennoch lassen sich mit dieser Perspektive erhebliche Effizienzgewinne mit der konkreten Verfolgung und Umsetzung von Zwischenschritten erreichen.
Von besonderer Bedeutung sind dabei die Themenfelder der Funkfernsteuerung von Lokomotiven sowie Automatisierungen in den Bereichen der Bremsprobe, der Kupplung, der Zugabfertigung, der Kontrolle der Zugkonfiguration, der Zugschlusserkennung usw. In all diesen Bereichen gibt es technische Lösungen und zum Teil auch praktische Anwendungsfelder. Diese zum Wohle des gesamten Bahnsektors miteinander zu verbinden und zum gemeinsamen Durchbruch zu bringen, das ist das Gebot der Stunde. Es gilt folglich, den im Eisenbahnsektor weit verbreiteten Ansatz des „Bewahrens des Bewährten“ aufzubrechen und zu einer klaren Innovationsorientierung zu gelangen, wie sie im Bereich des Straßengüterverkehrs vollkommen selbstverständlich ist. Das Ziel des Projektes liegt deshalb darin, die ersten Schritte auf dem Weg zur Realisierung dieser Vision in Angriff zu nehmen und den Einsatz von autonomen Rangierlokomotiven in den Häfen der Welt ab 2027 ausgehend von Bremen zu ermöglichen. Als Nebeneffekt wird dabei eine Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Häfen in ihrer Rolle als traditionellen Eisenbahnhäfen in Kauf genommen, wenn nicht gar beabsichtigt.

Schiffsführungssimulation für die Auslegung von Hafenzufahrten und Hafenanlagen

von Carl-Uwe Böttner[1]

Zusammenfassung

Die Schiffsführungssimulation hat sich in der Ausbildung von Nautikern bewährt und ist weltweit etabliert. In dem Maße in dem die Simulatoren weiter entwickelt wurden stieg deren Verwendung für andere Aufgaben neben Ausbildung und Training, unter anderem nautische Machbarkeits- und Befahrbarkeitsuntersuchungen. In der Möglichkeit eine solche Befahrung vollkommen risikolos durchführen zu können liegt die besondere Stärke dieser Methode. Dabei darf nicht übersehen werden, dass diese Fragestellungen abweichende Anforderungen sowohl an die Simulator-Ausstattung als auch an die an der Simulation beteiligten Personen stellen. Insgesamt überwiegen die Gemeinsamkeiten weshalb sich weltweit der Einsatz großer Schiffsführungssimulatoren von nautischen Schulen oder Trainingszentren für Befahrbarkeitsanalysen und Bemessungen von Wasserstraßen durchgesetzt hat. Einige Anforderungen unterscheiden sich jedoch so grundlegend, dass sie schon in der Vorbereitung einer solchen Simulation berücksichtigt werden müssen. In diesem Beitrag werden die Vorzüge und Schwächen der Schiffsführungssimulation für Bemessung von Hafenzufahrten und Hafenanlagen diskutiert.

1. Einleitung

Simulator-Stunden sind ein fester Bestandteil der Ausbildung an nautischen Schulen weltweit und verpflichtend gemäß der IMO Konvention STCW-95. Zum Nachweis der Eignung zur Ausbildung nach STCW werden die Schiffsführungssimulatoren von Klassifikationsgesellschaften zertifiziert. So listet zum Beispiel der Det Norske Veritas 164 Schiffsführungssimulatoren in der ganzen Welt auf, die nach deren Standard „2.14 Maritime Simulator Systems“ für Ausbildungs-Simulatoren zertifiziert sind. Um den heute verfügbaren, sehr hohen technischen Stand zu erreichen, war eine lange Entwicklung nötig. Bei Schiffsführungssimulatoren, wie bei Flugsimulatoren, wurde jede neue Entwicklung der Computertechnik aufgegriffen und genutzt, um die Realitätsnähe der Trainingsumgebung und der Trainingsszenarien immer weiter zu steigern. Bis in beiden Fällen der angestrebte Grad der Güte der „Virtual Reality“ der Simulationsumgebung erreicht wurde, dass in der Simulation erlangte Erfahrung und Expertise anerkannt wurde. In der Seefahrt wie in der Luftfahrt gelten Simulator-Stunden als erlangte Berufspraxis. Ein wesentlicher Schritt auf dem Weg dorthin war die Einbindung von Echtgeräten in die Simulation und der Aufbau einer realen nautischen Brücke im Simulator. Die Tiefe der „Immersion“, des gefühlten Eindringens in das Trainings-Szenario ist der Schlüssel zur erfolgreichen Ausbildung an einem Simulator. Hierfür kamen die beeindruckenden Entwicklungen der Film- und Computerspielbranche gerade recht: die optische Darstellung der Umgebung des Schiffs hat dadurch heutzutage fotorealistischen Charakter und trägt gemeinsam mit der vollständigen integrierten nautischen Brücke wesentlich dazu bei, dass der Trainee die Situation als realistisch wahrnimmt.

Umgekehrt führt jede unerwartete oder unrealistische Störung in einer Simulation dazu, dass das Eindringen in das Szenario abbricht und durch das Bewusstsein, es handele sich „nur“ um eine Computeranimation ersetzt wird.

Mit steigender Qualität der Sichtsysteme, mit immer fotorealistischerer Darstellung der Umgebung, Häuser, Kaianlagen, Hafenkräne, wurde es noch attraktiver mit einer Schiffsführungssimulation geplante Hafenanlagen und –Zufahrten schon zur Planungsphase be- und erfahren zu können.

In letzter Zeit werden verstärkt spezialisierte Simulatoren für den maritimen Bereich entwickelt und betrieben. Zum Teil handelt es sich um Erweiterungen für bestehende Anlagen, zum Teil auch um vollständig neue Konstruktionen. Verfügbar sind beispielsweise Simulatoren für das Manövrieren im Eis, für das Manövrieren mit Schleppern, für Hochsee-Bergemanöver, Kranen von Lasten an Bord, Operationen mit Hochseeversorgungsschiffen, Brandbekämpfung, Schiff zu Schiff Leichterung auf See, dynamisches Positionieren, Seenotrettung (SAR), LNG Handling und so weiter.

Einige dieser spezielleren Aufgaben erforderten zusätzliche und/oder erweiterte Manövriermodelle um die simulierten Prozesse und Vorgänge realistisch abzubilden. Jede Weiterentwicklung schiffsdynamischer Modelle verbessert zugleich die Einsatzfähigkeit eines Schiffsführungssimulators zur Befahrbarkeitsanalyse und Bemessung einer Wasserstraße, Hafenzufahrt oder Hafengestaltung.

1 Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg.
carl-uwe.boettner@baw.de

2. Unterschiedliche Anforderungen an den Simulator für Ausbildung und Bemessung

Die Ausbildung mit dem Schiffsführungssimulator zielt darauf ab, theoretisches Wissen zu festigen und grundlegende nautische Kenntnisse und Fertigkeiten in praxisähnlicher Umgebung zu vermitteln und zu erfahren. Die Ausstattung einer Schiffsbrücke im Simulator wird daher so echt wie möglich gestaltet. Manche Trainingszentren bieten verschiedene Brücken mit den Echt-Instrumenten integrierter Navigationssysteme unterschiedlicher Hersteller. Für die nautische Ausbildung ist neben den Echtinstrumenten und einer realistischen Darstellung der Umgebung mit den Navigationshilfen, ein realistisches Fahrverhalten des jeweiligen Schiffstyps auf dem trainiert wird, wichtig. Das Schiff muss sich charakteristisch verhalten, nicht notwendiger Weise genau wie ein ganz Bestimmtes, da die Ausbildung nicht für ein spezielles Schiff erfolgt. Anders ist es bei der Weiterbildung innerhalb einer Reederei, wenn die Crews für die Schiffe der eigenen Flotte trainieren. Für Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse muss die Simulation hingegen die Verhältnisse der Wasserstraße und die Fahrdynamik und Reaktionen des in Frage kommenden Schiffs möglichst exakt wiedergeben.

Sowohl bei der Aus- und Weiterbildung, als auch bei Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse ist zunächst notwendig, dass das Ziel der Simulation allen Beteiligten bekannt und klar spezifiziert ist. Anschließend trennen sich die Anforderungen und das Herangehen für die unterschiedlichen Zielstellungen etwas. In der Vorbereitung der Simulation und Aufbereitung der zugrundeliegenden Daten ist es vor allem der Grad der Detailtreue und der Genauigkeit der Umgebungsdaten, der sich unterscheidet.

Abhängig von der Zielstellung werden dann die Szenarien der einzelnen Simulator-Läufe geplant und angelegt. Für Aus- und Weiterbildung werden hier im Wesentlichen die Sicht, der Wind, der Seegang und der beteiligte Schiffsverkehr festgelegt. Im Falle der Befahrbarkeitsanalyse eines bestehenden Reviers muss große Sorgfalt darauf gelegt werden, dass die reviertypischen Merkmale vollständig in der Simulation wieder gegeben werden. Das gilt für die Bathymetrie in dem die aktuellsten Tiefendaten aus Peilplänen eingebaut werden, für den typischen regionalen und lokalen Wind, der nach Möglichkeit anhand von Statistiken von lokalen Messstationen festgelegt wird, für den Seegang, für Landmarken, Sichtverhältnisse, regionale und lokale Strömungen. All diese Randbedingungen, die die Befahrbarkeit einer Wasserstraße wesentlich beeinflussen, müssen festgelegt werden und sollten allen Beteiligten bekannt sein und deren Zustimmung finden.

Im nächsten Schritt muss das Manövrierverhalten der zu untersuchenden Schiffe abgestimmt werden. Für Aus- und Weiterbildung ist es dabei ausreichend, dass sich das Schiff seinem jeweiligen Typ entsprechend charakteristisch verhält und als solches erkannt und akzeptiert wird. Für die Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse oder zur Überprüfung und Festlegung wasserpolizeilicher Restriktionen, beispielsweise Geschwindigkeitsbeschränkungen, ist es notwendig, dass die Übereinstimmung des Fahrverhaltens im Simulator mit dem Schiff, das in dem Revier verkehrt und für das die Untersuchung im Wesentlichen durchgeführt wird, so hoch wie irgend möglich ist. Diese Abstimmung des Fahrverhaltens im Simulator gestaltet sich aufwändig und häufig schwierig, nicht zuletzt da es sehr selten Manöverdaten von Messfahrten zu einem Schiff zur Verfügung stehen, und wenn, dann sind diese in den allermeisten Fällen nicht bei Flachwasserbedingungen und in beengtem Fahrwasser durchgeführt worden.

Revierfahrt und Hafenzufahrten sind bis auf ganz wenige Ausnahmen geprägt von geringen Wassertiefen und seitlich beschränkten Fahrwassern. Schiffe, die in diesen Wasserstraßen verkehren interagieren mit dem Boden und den seitlichen Böschungen oder Wänden der Wasserstraße. Diese sogenannten Flachwassereffekte, die direkt und deutlich vernehmbar das Fahrverhalten eines Schiffes beeinflussen, sind nichtlinear und anspruchsvoll in der mathematischen Beschreibung, Modellierung und in der Abstimmung der Effekte in der Simulation für ein bestimmtes Schiff. Da derzeit noch nicht alle der Effekte mit ausreichender Modelltiefe in den Simulatoren zur Verfügung stehen, liegt es meist an der Erfahrung und Findigkeit des Betreibers eines Simulators, hier die Einstellungen und Abstimmungen so zu wählen, dass das simulierte Fahrverhalten des Schiffes möglichst nah an die Realität heran kommt.

Die oben genannten Böschungen am Rand eines Fahrwassers führen bei Annäherung mit einem Schiff zu einem Interaktionseffekt, der gemeinhin Banking genannt wird (engl. „Bank Effect“) und zu gefährlichen Situationen mit Unfällen führen kann, wenn Schiffe mit höherer Geschwindigkeit zu nahe an der Böschung entlang fahren. Hierbei baut sich hydraulisch eine anziehende Kraft in Richtung zur Böschung auf, die etwas achterlich am Schiff angreift und zu einer Annäherung des Hecks und einem abdrehen des Bugs von der Böschung weg führt. Bei weiterer Annäherung kommt es meist zu einem abrupten „Absetzen“, das in engen Fahrwas-

sern mit dichtem Schiffsverkehr entweder zur unabwendbaren Kollision mit der gegenüberliegenden Böschung oder mit anderen Schiffen führt. Dieser Effekt hat offensichtlich eine hohe Bedeutung bei der Festlegung ausreichender Fahrwasserbreiten oder zulässiger Höchstgeschwindigkeiten. Er muss daher im Simulator sehr sorgfältig eingestellt und abgestimmt werden, was besonders für ungewöhnliche Böschungsformen schwierig ist, da es so gut wie keine Vergleichswerte und wenig Anhaltspunkte für eine Abschätzung anhand bekannter Werte gibt.

Vor 25 Jahren wurden zwei Berichte veröffentlicht, die Empfehlungen zum Aufsetzen und Durchführen von Schiffsführungssimulationen zur Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse von Hafenzufahrten und Hafengestaltung zusammenstellten. Der eine wurde von einer Gruppe aus Spezialisten in den USA [Webster (ed.) (1992)] und der andere von einer internationalen Arbeitsgruppe [PIANC (1992)] erstellt. Aktuell arbeitet die Arbeitsgruppe 171 der PIANC an einem weiteren Report, der den Entwicklungen und Erfahrungen des vergangenen Vierteljahrhunderts Rechnung tragen soll, in dem dieser die genannten Berichte ergänzt und aktualisiert. Dieser Report soll als Handbuch zur Schiffsführungssimulation für Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse dienen.

3. Das Human Element in der Schiffsführungssimulation

Grundsätzlich ist das Human Element der Anlass und Grund für die Verwendung eines Schiffsführungssimulators bei der Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse. Andernfalls reichten rein geometrische Betrachtungen und ingenieursmäßigen Abschätzungen der wirkenden Kräfte aus, um über eine sichere Befahrbarkeit zu entscheiden.

Neben dieser grundlegenden Funktion spielt das Human Element in allen Bereichen einer Simulation eine Rolle. Ein elementar wichtiger Teil einer Simulation für Bemessung oder Befahrbarkeitsanalyse ist die Prüfung und Abnahme der Umweltbedingungen und der Fahrdynamik der Schiffe, das „Set-up“ der Simulation, das alle weiteren Ergebnisse wesentlich bestimmt. Gewöhnlich entscheiden erfahrene Nautiker, meist Lotsen, die das zu untersuchende Revier sehr gut kennen, durch Vergleich mit Erwartungen aus ihrer Erfahrung, über die Akzeptanz der Einstellungen. Die Erfahrung und Mitarbeit der revierkundigen Nautiker hat offensichtlich eine sehr hohe Bedeutung für die Qualität des zu erzielenden Ergebnisses.

Ebenfalls sehr bedeutend ist die Vertrautheit des Betreibers des eingesetzten Simulators mit seiner Anlage. Häufig muss er Wege kennen oder finden, um in der Simulation einen bestimmten Effekt oder ein bestimmtes Verhalten so einzustellen, wie es die revierkundigen Nautiker beschreiben, obwohl es mit dem Konzept des Simulator-Herstellers nicht vorgesehen ist.

Häufig ist es sehr schwer, die üblicherweise auftretende Lücke zwischen den Anforderungen an die Realitätsnähe der Simulation und der tatsächlich zur Verfügung stehenden Modelltiefe der mathematisch physikalischen Modellierung zu schließen. Eine sorgfältig abgestimmte und eingestellte Simulation, besonders im Zusammenspiel mit der annähernd fotorealistischen Darstellung der Szenerie, die heutige Sichtsysteme bietet, führt bei den Anwesenden, aber nicht direkt beteiligten Teilnehmern, schnell zu dem Eindruck einer perfekt simulierten Physik und zu unrealistischen und überzogenen Erwartungen an die Möglichkeiten und die Aussagekraft einer Simulation. Auch bei den Nautikern am Fahrstand führen die fotorealistische Darstellung und die aufwändige Ausstattung der Instrumentierung der Brücke zu dem Eindruck sehr hoher Realitätsnähe, dass sie im Revier schwierige Manöver bisweilen als eher ungefährlich und weniger Anspruchsvoll einschätzen, da sie in der Simulation leicht durchführbar waren.

Der wichtigste und zugleich schwierigste Teil bei der Überprüfung einer geplanten Hafenzufahrt oder Hafenanlage besteht in der Auswertung der in der Simulation gemachten Erfahrungen. Hierzu ist es notwendig sorgsam nach jedem Lauf die ersten Eindrücke zu sichern und die gemachten Erfahrungen in einem ausreichend ausgedehnten Auswertungsgespräch unter Anwesenheit aller Beteiligten zusammenzutragen. Die abschließende Bewertung kann nur bei Kenntnis aller gemachten Erfahrungen unter den verschiedenen untersuchten Bedingungen erstellt werden. Hierbei muss sorgfältig zwischen individueller Erfahrung und persönlichen Meinungen und Befindlichkeiten getrennt werden, um die angestrebte offene, ehrlich-neutrale und belastbare Einschätzung der nautischen Situation in der geplanten Wasserstraße zu gewinnen.

Über die Qualität und den Erfolg einer solchen sehr speziellen Schiffsführungssimulation entscheidet demnach neben der fachkundigen Handhabung der Simulator-Anlage der sorgfältige und konzentrierte Einsatz jedes Beteiligten an der Untersuchung. Besonders die Lotsen oder Nautiker am Fahrstand sind gefordert jeden Lauf in der Simulation auf Basis ihrer Erfahrungen und Kenntnisse so objektiv wie möglich einzuschätzen und zu bewerten.

4. Schlussfolgerung und Ausblick

Große Schiffsführungssimulator-Anlagen mit sogenannten „full mission bridges“, also vollständig ausgestatteten integrierten Brücken mit allen nautischen Geräten und Hebeln, die sich auch an Bord des jeweiligen Schiffstyps befinden, sind das derzeit beste verfügbare Werkzeug um eine Planungsvariante bei Um- oder Neubauten von Wasserstraßen, Hafenzufahrten oder Hafenanlagen auf Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Seeverkehrs zu überprüfen. Der derzeitig verfügbare Stand an mathematisch physikalischen Manövriermodellen zusammen mit annähernd fotorealistischer Darstellung der Umgebung macht die Überlegenheit der Schiffsführungssimulation aus, solange allen Beteiligten die Grenzen und Vereinfachungen einer Simulation gegenwärtig sind und diese bei der Bewertung der Ergebnisse der Simulation berücksichtigen.

Der Bericht der PIANC Arbeitsgruppe 171 wird den Stand der Technik verfügbarer Schiffsführungssimulatoren für die Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse zusammenfassen und zusätzlich Empfehlungen für sinnvoll erachtete Weiterentwicklungen geben. Dies betrifft sowohl die wissenschaftliche Forschung im Bereich der Hydrodynamik als auch die Ergänzung von Soft- und Hardware um weitere Funktionalitäten in den Schiffsführungssimulatoren.

Literatur

PIANC (1992) Capability of ship manoeuvring simulation models for approach channels and fairways in harbours. Report of Working Group No. 20 of Permanent Technical Committee II. Brussels, Belgium: General Secretariat of PIANC (Supplement to Bulletin no. 77 (1992))

Webster, W.C. (ed.) (1992), Shiphandling simulation. Application to waterway design. National Research Council (U.S.). Washington, D.C: National Academy Press. Online available: http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=14163.

Optimierung von Vertäueinrichtungen und Hafenstrukturen durch dynamische Berechnung der Vertäulasten

by Oliver Stoschek[1], Stefan Leschka[2], Christian Hein[3] and Anja Brüning[4]

1. Einleitung

In vielen Häfen wurden die Vertäueinrichtungen bereits vor vielen Jahren oder Jahrzehnten geplant und gebaut. Sie sind, verglichen mit den heute fahrenden Schiffen, für deutlich kleinere Einheiten ausgelegt worden. Die Schiffsgrößen haben sich seitdem rasant verändert, so dass heute deutlich höhere Schiffe mit über 400 m Länge in den Häfen vertäut werden müssen. Viele existierende Vertäueinrichtungen, die internationalen Richtlinien (PIANC, OCIMF) und die lokalen Richtlinien (z.B: EAU) sind für kleinere Schiffseinheiten ausgelegt und halten mit dieser Entwicklung nicht Schritt. Die Anwendung der Richtlinien kann zu einer deutlichen Überdimensionierung führen.

Zur Ermittlung der tatsächlichen Vertäukräfte und zur Dimensionierung bestehender oder neuer Vertäueinrichtungen können dynamische Vertäuberechnungen eine effektive Hilfe zur Ermittlung realistischer Belastungen darstellen. Kurzfristig kann die Methode helfen, bestehende Vertäueinrichtungen zu analysieren, Schwachpunkte zu identifizieren und die Lebensdauer der Anlagen zu verlängern.

DHI hat eine entsprechende Software zur Berechnung der dynamischen Trossenkräfte entwickelt (MIKE 21 Mooring Analysis (MA), DHI, 2017). Im Vergleich zu anderen Produkten können zusätzlich zu dynamischen Windfeldern auch zweidimensionale Strömungs- und Wellenfelder berücksichtigt werden, deren Betrachtung in Häfen einen wichtigen Einfluss auf die Ergebnisse haben kann. Die

Abbildung 1: Übersicht der Projektgebiete

1 DHI WASY GmbH, Niederlassung Bremen, Knochenhauerstr. 20-25, 28195 Bremen, oliver.stoschek@gmx.de
2 DHI WASY GmbH, Niederlassung Bremen, Knochenhauerstr. 20-25, 28195 Bremen, sle@dhigroup.com
3 Bremenports GmbH & Co. KG, Am Strom 2, 27568 Bremerhaven, christian.hein@bremenports.de
4 Sellhorn Ingenieurgesellschaft mbH, Teilfeld 5, 20459 Hamburg, anja_bruening@gmx.de

Software wurde bereits in zahlreichen Studien weltweit angewendet. Drei Beispiele aus Deutschland (Bremerhaven, Wilhelmshaven und Hamburg) werden hier vorgestellt. Eine Übersicht über die Projektgebiete ist in Abbildung 1 gegeben.

In Bremerhaven wurde eine dynamische Vertäuberechnung für besondere Schiffsformen unter Berücksichtigung vorbeifahrender Schiffe durchgeführt. In Wilhelmshaven bestimmen Schiffspassagen und Strömungen die Trossenkräfte. Wind ist in Hamburg die größte Kraft, die auf neuartige Containerschiffe (VLC, ULC, etc.) wirkt. Die Berechnung der dynamischen Trossenkräfte in den Beispielen führt zu genaueren und vielfach im Vergleich zur EAU geringeren Bemessungsgrößen für die Vertäueinrichtungen. In dieser Veröffentlichung wird die Methodik der dynamischen Vertäuanalyse und die Anwendung auf die genannten Beispiele beschrieben.

2. Dynamische Vertäuanalyse

Die hydrodynamische Interaktion von schwimmenden Körpern und dem Wasserkörper wird hinreichend genau mit der linearen Theorie der Potentialströmung beschrieben. Dieser Ansatz ist gültig, solange $\frac{kA}{tanh(kh)} \ll 1$, wobei A die Wellenamplitude, k die Wellenzahl und h die Wassertiefe ist. Es wird weiterhin angenommen, dass die Bewegung des schwimmenden Körpers klein ist, was durch das Vertäusystem gewährleistet wird. Weiterhin wird angenommen, dass vernachlässigte hydrodynamische Effekte durch empirische Koeffizienten in die Berechnung einbezogen werden können.

Unter diesen Annahmen kann die Bewegungsgleichung

$$\sum_{k=1}^{6}\left(M_{jk}+a_{jk}\right)\ddot{x}_k(t)+\int_0^t K_{jk}(t-\tau)\dot{x}_k(\tau)d\tau+C_{jk}x_k(t)=F_{jD}(t)+F_{jnl}(t) \quad (1)$$

im Zeitbereich gelöst werden. Linkerhand beschreibt der erste Term die Trägheitskräfte, der zweite Term die hydrostatischen Kräfte und der dritte Term die hydrodynamischen Kräfte erster Ordnung infolge der Wellensteilheit (Bingham, 2000). Sie werden als Impuls-Resonanz-Funktionen (IRF's) bezeichnet. Die Matrizen M_{jk}, C_{jk} und K_{jk} sind 6x6-Matrizen des schwimmenden Körper-Systems. M_{jk} und C_{jk} sind dabei die Trägheitsrückstell-Matrix und die hydrostatische Rückstell-Matrix. a_{jk} sind Impuls-Beiträge (zusätzliche Masse), die aus der t = 0-Bedingung des Streuungsproblems herrühren. Die Kräfte aus den gestreuten Wellen, die durch die Körperbewegung induziert werden, werden als Faltung der Streuungs-IRF K_{jk} ausgedrückt. Rechterhand, sind alle nicht-linearen externen Kräfte zusammengefasst, wie z.B. die des Vertäusystems, die der viskosen und Reibungsdämpfung (Froude-Krylov-Kraft) $F_{jnl}(t)$ und die der Wellenanregungskräfte durch die Streuung der einlaufenden Welle $F_{jD}(t)$.

Der Verschiebung und die Winkeländerung des schwimmenden Körpers in den sechs Freiheitsgraden (DOF) $x_j(t)$ sind in kartesischen Koordinaten ausgedrückt, wobei $x_1=x$ die longitudinale Schiffsachse (nach vorn zeigend) beschreibt. Die Verschiebungen des Körpers sind demnach x_1 = wogen, x_2= schwoien und x_3 = tauchen. Die Rotationen sind x_4 = rollen, x_5 = stampfen und x_6 = gieren. Die Punkte über den Parametern kennzeichnen deren zeitliche Differentiation an (Bingham, 2000).

Der zweite Term in Gleichung (1) allein macht die Berechnung der Matrizen $K_{jk}(t)$, $a_{jk}(t)$ jedoch durch die Faltung im Zeitbereich ineffizient. Daher werden diese hydrodynamischen Berechnungen im Frequenzbereich durchgeführt.

Die hydrodynamischen Koeffizienten im Frequenzbereich werden Frequenz-Resonanz-Funktionen (FRF) genannt:
Hierin sind $\tilde{F_{jD}}(\omega)$ die Anregungskräfte als Funktion

$$\sum_{k=1}^{6}\left\{-\omega^2\left[M_{jk}+A_{jk}(\omega)\right]+i\omega B_{jk}(\omega)+C_{jk}\right\}\tilde{x}_k(\omega)=\tilde{F}_{jD}(\omega),\ j=1,2,\ldots,6 \quad (2)$$

der Wellenfrequenz. ω, $\tilde{x_k}(\omega)$ ist der Einheitsvektor für die sechs Freiheitsgrade (Degrees of Freedom DOF). Eine vollständige Streu-Analyse des Körpers wird durchgeführt, indem die zusätzliche-Masse-Koeffizienten-Matrix $A_{jk}(\omega)$ als reeller Teil und die Dämpfungs-Koeffizienten-Matrix $B_{jk}(\omega)$ als imaginärer Teil des Streuungspotentials $\varphi_j(\omega)$ gleichverteilter Frequenzen über die signifikante Frequenzbandbreite berechnet werden (einschließlich ω=0,∞).

Das Streuungspotential wird mit Hilfe der Randelementmethode ermittelt. Die Wellenanregungskräfte werden durch die Streuungspotentiale des Boussinesq-Wellenfeldes über die Haskind-Beziehung ausgedrückt. Alle Transformationen aus dem Frequenzbereich in den Zeitbereich werden durch die schnelle Fouriertransformation durchgeführt. Wellenabtriebskräfte zweiter Ordnung werden durch die Newman-Näherung (Newman, 1977) berechnet. Für zusätzliche Details wird auf Babarit & Delhommeau (2015) und DHI (2018) verwiesen.

MIKE 21 MA berücksichtigt in jedem Zeitschritt

- Zweidimensionale Wellen-, Strömungs- und Windfelder und deren Kombinationen, oder (falls nicht verfügbar)
- Zeitreihen, die leicht aus spektralen Beschreibungen gebildet werden können
- die Elastizität der Vertäuleinen und Fender durch Arbeitskurven, die im Rahmen der Software-Installation bereitgestellt werden oder von Herstellern herangezogen werden können
- die reale Schiffshülle und ihre Frequenzresonanz (Stichwort „Eigenfrequenz“).

und somit die korrekte zeitliche Abfolge der Einwirkungen und Reaktionen des Gleichgewichtssystems. Dies ermöglicht eine detaillierte Untersuchung realistischer Fälle in einzigartiger Weise. Abbildung 2 zeigt eine typische Situation, in der MIKE 21 MA angewandt wird.

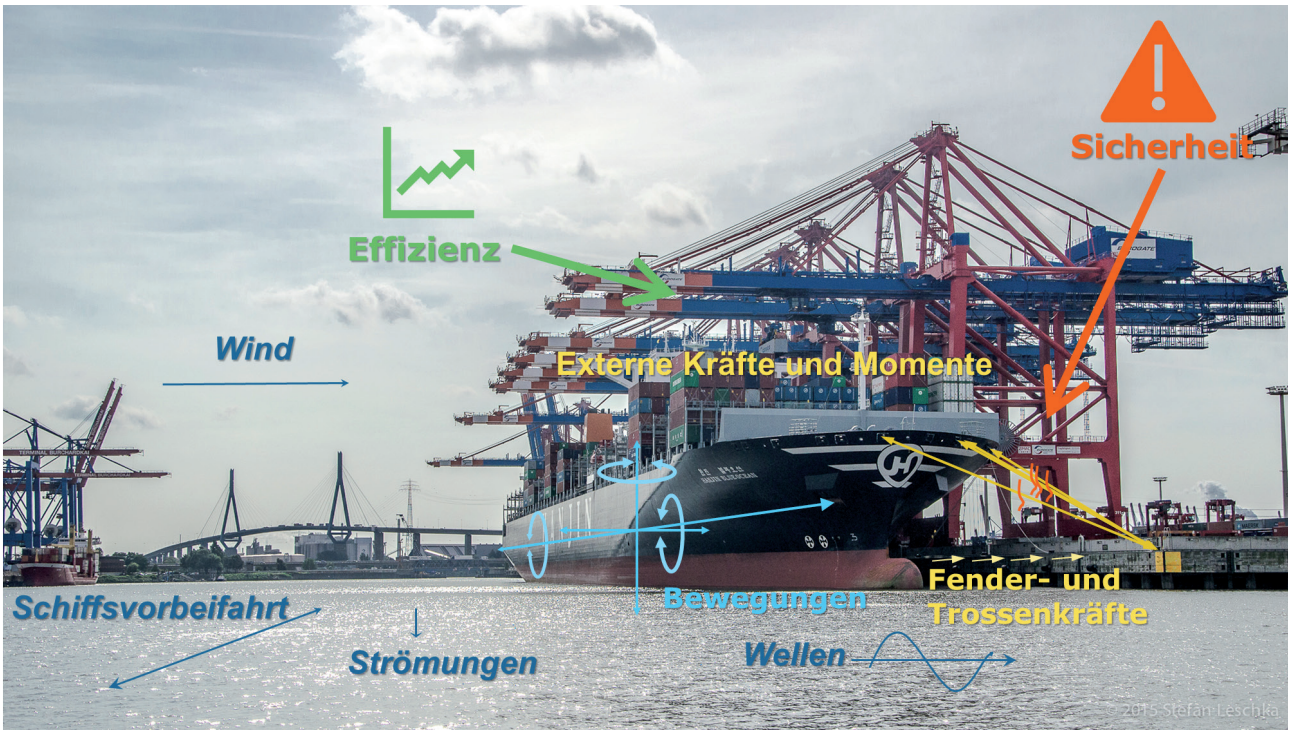


Abbildung 2: Typische Anwendung von MIKE 21 MA

3. Offshore Terminal Bremerhaven

Für die Entwicklung des Hafengebietes “Fischereihafen” wird an der Weser in Bremerhaven ein neues Terminal geplant. Das Offshore Terminal Bremerhaven (OTB) liegt im Blexer Bogen in der Außenkrümmung der Weser (Abbildung 3 und 4).

Das Terminal liegt in der Nähe der Fahrrinne der Weser. Am Blexer Bogen passieren die Schiffe das geplante Terminal in geringer Entfernung, so dass hier ein Einfluss auf vertäute Offshore Spezialschiffe entsteht. Das Ziel der Untersuchungen ist es, eine potentielle Gefährdung der vertäuten Schiffe durch den dynamischen Absunk fahrender Schiffe zu ermitteln.

Das DHI Tool MIKE 21 MA in der Kombination mit dem hydrodynamischen Modul MIKE 21 HD wurde für die Untersuchungen verwendet. Die Methodik ist in Abbildung 5 dargestellt.

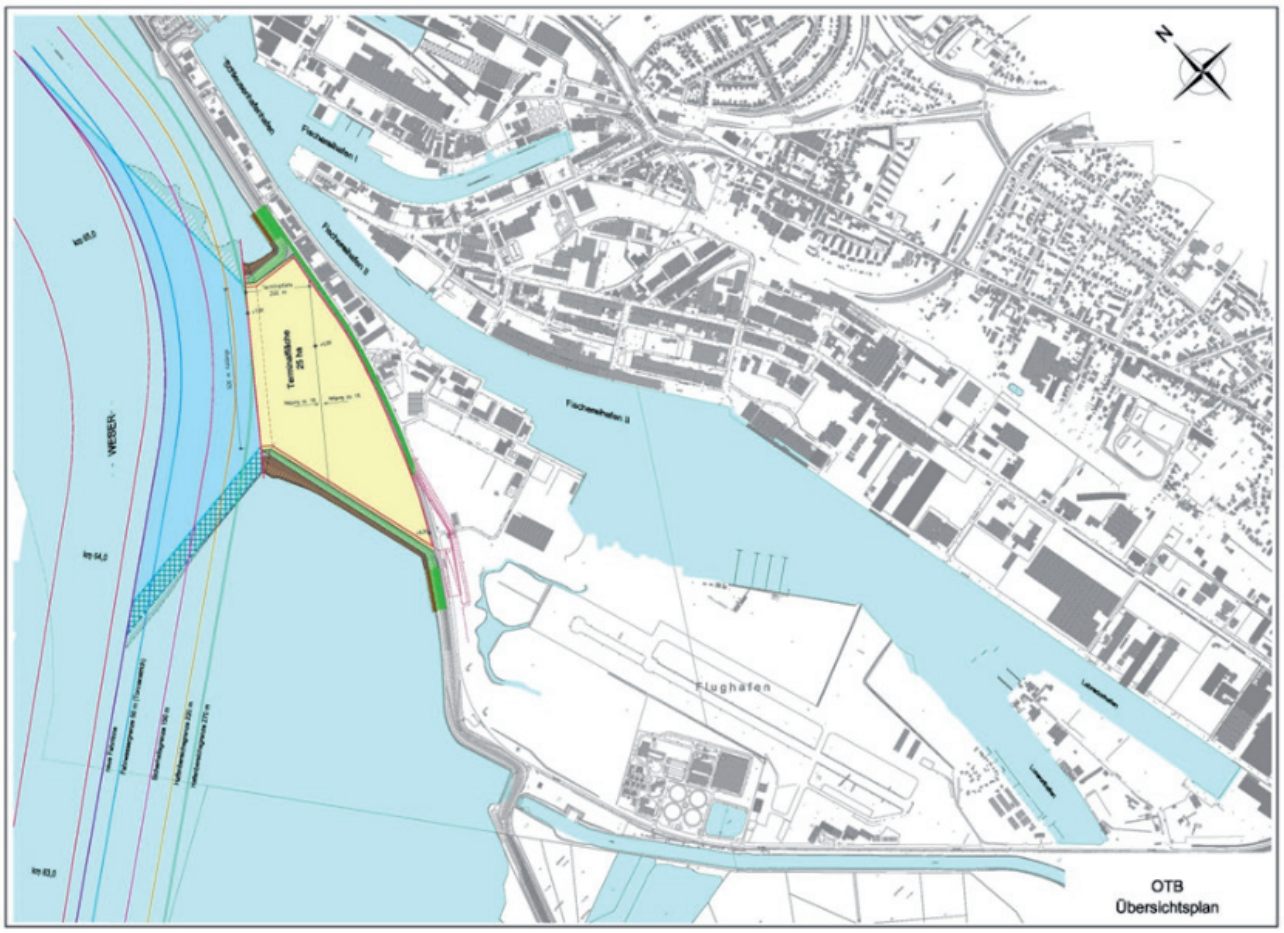


Abbildung 3: Lage des geplanten OTB im Blexer Bogen, Weser

Abbildung 4: Übersicht über das geplante Industriegebiet des OTB am Blexer Bogen

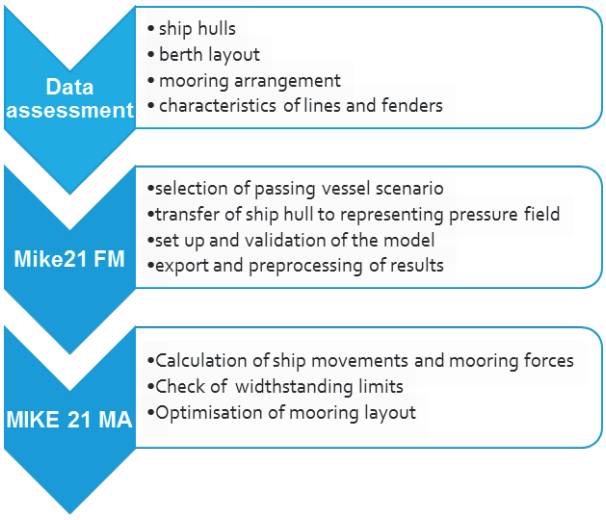


Abbildung 5: MethodikOTB am Blexer Bogen

Einen größeren Aufwand hat die Datenbeschaffung und -aufbereitung verursacht (Schiffshülle, Layout des Anlegers, Charakteristik der Vertäuung). Ein weiterer wichtiger Baustein war der Modellaufbau des MIKE 21 FM HD (Flexible Mesh, HydroDynamic Module) auf der Basis von Schiffspassagen aus nautischen Untersuchungen. Der Methodik folgend wurde die Vertäuung iterativ dem dynamischen Absunk aus der Schiffspassage angepasst und optimiert.

Empirische Gleichungen zur Bestimmung des dynamischen Absunkes und der Vertäukräfte können weder lokal unterschiedliche Wassertiefen noch den Effekt von Flusskrümmungen oder einen variablen Abstand zum Ufer berücksichtigen. Der hier gewählte Ansatz der Modellierung eines bewegten Druckfeldes in Form des Schiffsrumpfes in einem 2D Modell ermöglicht diese Betrachtungen. Das Modell verwendet dafür ein Finite Volumen Modell diskretisiert mit Dreiecken und Vierecken (DHI, 2017). In Abbildung 6 (links) ist ein Detailausschnitt des Modellnetzes in der Nähe des OTB dargestellt. Die Schiffshüllen der unterschiedlichen vorbeifahrenden Schiffe, deren Route und maximalen Geschwindigkeiten wurden in das Modellgebiet übertragen. Der Absunk und die erzeugten Wellen wurden zur Kontrolle des Modells mit Messungen entlang der Weser verglichen. Die Abbildung 6 (rechts) zeigt den Schiffsabsunk nahe des OTB.

Für die Ermittlung der für die Vertäuung am OTB kritischen Schiffspassage wurden nautische Simulationen mit Fokus auf den Abstand zum OTB, der Geschwindigkeit durch Wasser (STW) und über Grund (SOG) durchgeführt. Die größte Geschwindigkeit aus dem nautischen Modell (STW) wurde im hydrodynamischen Modell als konservative Randbedingung gewählt. Als zweiter Schritt wurden der Absunk und die zugehörigen Strömungen mit der Vertäusoftware gekoppelt.

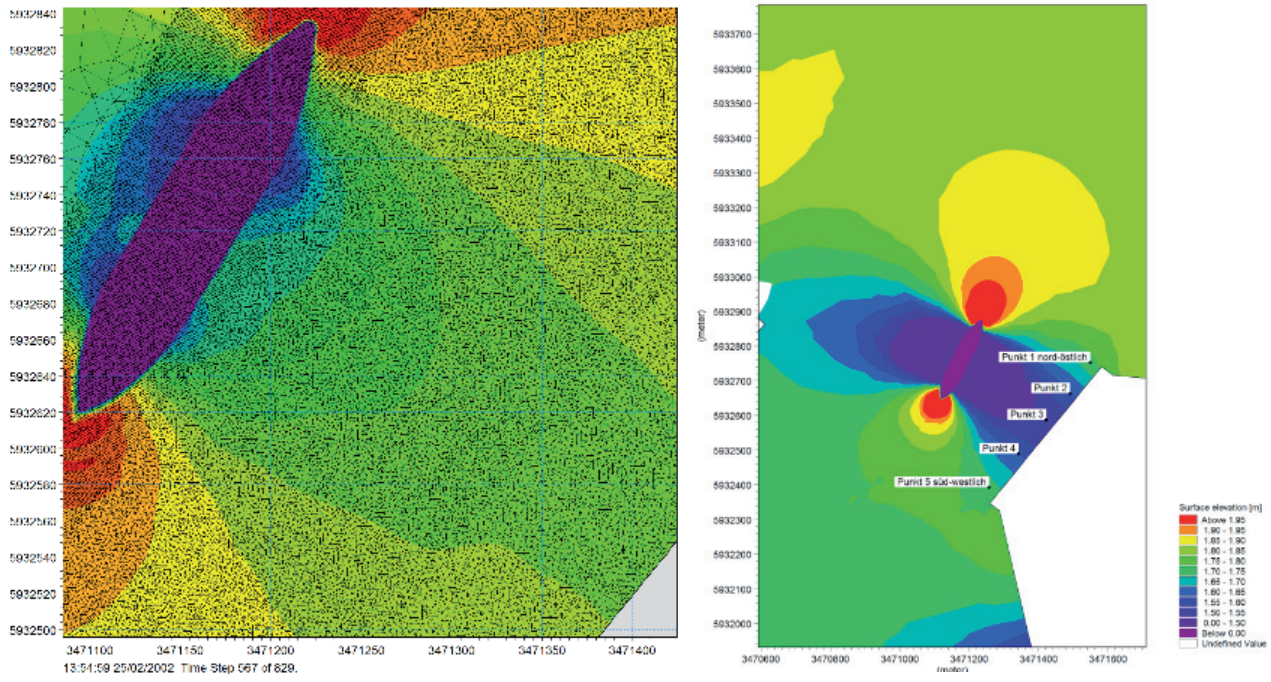


Abbildung 6: Hülle des passierenden Schiffes im Modellnetz (links) und dynamischer schiffsinduzierter Absunk vor dem OTB (rechts)

Unterschiedliche Transportschiffe und Hubschiffe / Errichterschiffe wurden untersucht. Als ein Beispiel wurde das Transportschiff der P2-Klasse mit 2 Vertäuungen untersucht (Abb. 7). Die ursprüngliche Anzahl von 8 synthetischen Leinen stellte sich als nicht hinreichend heraus. Ein weiteres Setup mit zusätzlichen 2 Spring- und 2 Vorleinen wurde untersucht. Da die Vertäueinrichtungen an Bord des Schiffes nicht ausreichend waren musste ein landgestütztes System (Shore Tension) für die Erzeugung der notwendigen Vorspannung vorgesehen werden.

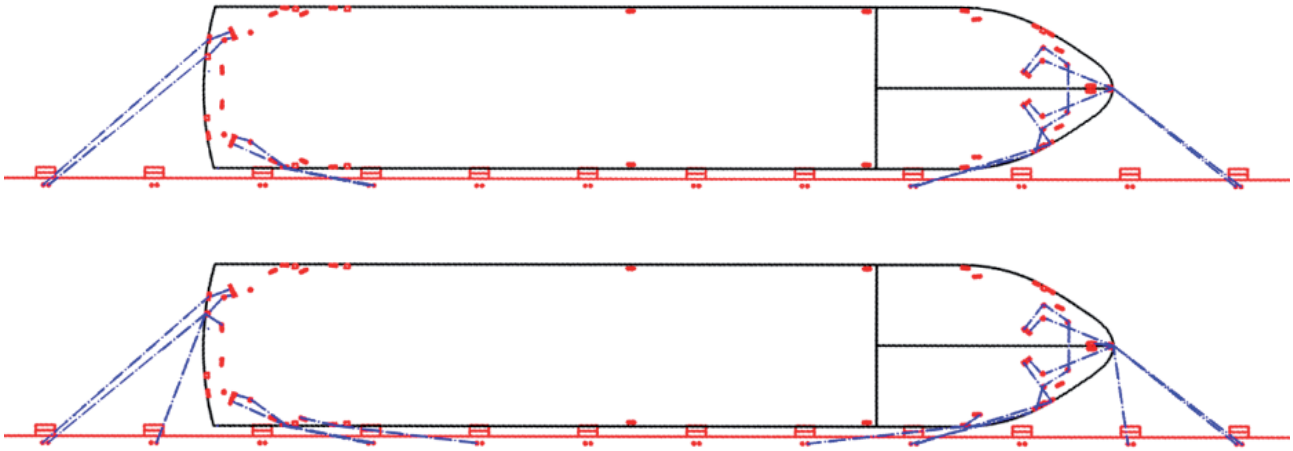


Abbildung 7: Vertäuung des Transportschiffes der P2-Klasse. Oben: ursprüngliche Vertäuung; Unten: Optimierte Vertäuung mit zusätzlichen Leinen und Shore Tension System

Die höchsten Trossenkräfte und Bruchlasten für die verwendeten Vertäuleinen sind beispielhaft in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigten, dass in einigen Fällen die Bruchlast der Vertäuleinen durch den dynamischen Absunk überschritten und zusätzliche Vertäuleinen notwendig wurden. Die dabei auftretenden Schiffsbewegungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Die Referenz für die maximalen Schiffsbewegungen während des Beladens wurde aus den PIANC Richtlinien (PIANC 1995) entnommen. Die Richtlinie basiert auf Erfahrungen und praktischen Untersuchungen und erlaubt eine gute Abschätzung für die hier verwendeten Ladevorgänge.

Schiffstyp	MBL [kN]	Reduzierte MBL [kN]	Max. Kraft [kN]	ursprüngliche Vertäuung
Transportschiff P2-Klasse (8 Vertäuleinen)	480	240	291	121 %
Transportschiff P2-Klasse (8 + 4 Vertäuleinen mit shore tension)	480	240	203	84 %
Ponton (mit Ballast)	990	495	144	29 %
Ponton (beladen)	990	495	280	56 %
Errichterschiff 1 (6 Vertäuleinen)	511	230	263	114 %
Errichterschiff 1 (6 Vertäuleinen + 2x Springleinen)	511	230	180	78 %
Errichterschiff 2 (12 Vertäuleinen)	850	425	277	65 %

Tabelle 1 : Maximale Trossenkräfte je Vertäuleine resultierend aus der dynamischen Lastbetrachtung. Überschreitungen der Bruchlast (MBL) sind in Rot gekennzeichnet.

Schiffstyp	Wogen [m]	Schwoien [m]	Tauchen [m]	Rollen [°]	Stampfen [°]	Gieren [°]
Transportschiff P2-Klasse (8 Vertäuleinen)	4.49	0.06	0.40	1.62	0.19	0.16
Transportschiff P2-Klasse (8 + 4 Vertäuleinen mit shore tension)	2.72	0.05	0.40	0.60	0.19	0.14
Ponton (mit Ballast)	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
Errichterschiff 1 (6 Vertäuleinen)	2.40	0.12	0.40	0.21	0.21	0.40
Errichterschiff 1 (6 Vertäuleinen + 2x Springleinen)	1.58	0.12	0.40	0.13	0.19	0.32
Errichterschiff 2 (12 Vertäuleinen)	0.94	0.17	0.39	0.22	0.20	0.14

Tabelle 2 : Ergebnisse der Berechnungen für maximale Bewegungen unterschiedlicher Schiffe. Überschreitungen der Bewegungsgrenzen für Beladung sind in Rot gekennzeichnet.

Überwiegend sind die hier dargestellten Ergebnisse zu den Schiffsbewegungen deutlich geringer als die empfohlenen Grenzwerte. Lediglich das Wogen ist in einigen Fällen überschritten. Für das Transportschiff der P2 Klasse mit optimierter Vertäuung und Shore Tension System ist es z.B. nicht möglich, die Bewegung in ein akzeptables Maß zu dämpfen. Der Grenzwert für Wogen von 2 m ist hier mit 36% überschritten. Die hier untersuchte Situation der Vorbeifahrt ist jedoch sehr selten, so dass die Verladung beim Auftreten dieser Situation unterbrochen werden kann. Die Überschreitung der Bewegungen des Errichterschiffs ist jedoch unkritisch. Voraussichtlich werden sich die Errichterschiffe während des Verladevorganges auf ihre Stützen stellen und somit unabhängig von der Vertäuung die Verladung vornehmen. Weitere Informationen zu dem Projekt finden sich bei Brüning et al (2014).

4. Massengut-Anleger Niedersachsenbrücke, Wilhelmshave

Der Jade-Weser-Port in Wilhelmshaven verfügt über eine tiefe Zufahrt und konzentriert sich auf große Container-, Stückgut- und Massengut-Frachter. Die „Niedersachsenbrücke“ ist der Hauptanleger für den Kohleimport für das nördliche Deutschland. Der Anleger ist auf aufgeständert und befindet sich ca. 1100 m vor dem Festland. Zwei Kohlekraftwerke beziehen ihre Kohle direkt vom Anleger. Er wurde ursprünglich in den späten 60’er Jahren des vergangenen Jahrhunderts mit einem landseitigen Liegeplatz für kleine Massengutfrachter (Feeder) und einem seeseitigen Liegeplatz für Post-Panamax-Frachter von mehr als 300 m Länge geplant. Der Anleger kann außerdem für den Umschlag von einem auf das andere (simultan vertäute) Schiff verwendet werden.

Nach dem Bau des Jade-Weser-Ports nördlich der Niedersachsenbrücke wurden Änderungen am bereits bestehenden Massengut-Anleger notwendig, da sich folglich Strömungen und strömungsinduzierte Belastungen änderten. Eine erneute Bestimmung der Vertäulasten (CES, 2002) trug den statischen Lasten (aus Wind und Strömung) Rechnung. Im Rahmen einer statischen Prüfung der erwarteten operationellen Bedingungen durch WK Consult stellte sich heraus, dass sich die Lasten durch simultan vertäute Schiffe an beiden Seiten des Anlegers nahe der maximal zulässigen Belastung ergeben können. Eine vereinfachte Analyse zeigte kritische Belastungen in einigen Teilen der Konstruktion. Weiterhin waren keine Informationen zu simultan vertäuten Schiffen sowie vorbeifahrenden Schiffen verfügbar. Weitere dynamische Kräfte, z.B. durch Wellen, waren in den bisherigen Untersuchungen nicht berücksichtigt worden. Dies wurde als kritisch angesehen, vor allem im Hinblick auf zukünftige Anforderungen, nach denen zwei große Massengutfrachter simultan am Anleger vertäut werden sollen.

Um einen umfassenden und realistischen Überblick über die Vertäulasten zu bekommen, wurden durch DHI dynamische Vertäuberechnungen durchgeführt, in der die Einwirkungen aus Wind, Strömungen (aus Messungen) und vorbeifahrenden Schiffen (aus hydrodynamischen Simulationen) miteinander kombiniert wurden. Die Untersuchung wurde in Kooperation mit Manzenrieder und Partner durchgeführt, die Wasserstands- und Strömungsmessungen durchführten, und mit dem Nautischen

Büro Bremen, die AIS-Daten analysierten, um eine repräsentative Schiffsvorbeifahrt simulieren zu können.

Die Schiffe, Vertäuleinen und Fender sind in Tabelle 3 beschrieben. Eine beispielhafte Vertäuanordnung ist in Abbildung 8 dargestellt.

Liegeplatz	**seeseitig**	**landseitig**
Schiffstyp	**Massengutfrachter**	**Massengutfrachter**
DWT	250,000	40.000
Länge über alles	323.5 m	220 m
Länge zwischen den Loten	310 m	210 m
Breite	52 m	28 m
Tiefgang	18.5 m	11.5 m
Beladung	75 %	100 %
Freibord	9.5 m	4.5 m
Transversale Windangriffsfläche	1600 m²	1200 m²
Longitudinale Windangriffsfläche	6500 m²	4000 m²
Vertäuleinen	**HTTP**	**HTTP**
Anzahl der Leinen	16	12
Durchmesser	72	60
Minimale Bruchlast	84 t	60 t
Fender	**Super Cone SCN 1100**	**Zylinderfender 2000x1200**
Maximale Reaktionskraft	2348 kN	2000 kN
Maximale Zusammendrückung	1.65 m	1.2 m

Tabelle 3: Schiffsparameter (Voss, 2008; Albrecht 2011; CES, 2011; Salzgitter Consult, 1989)

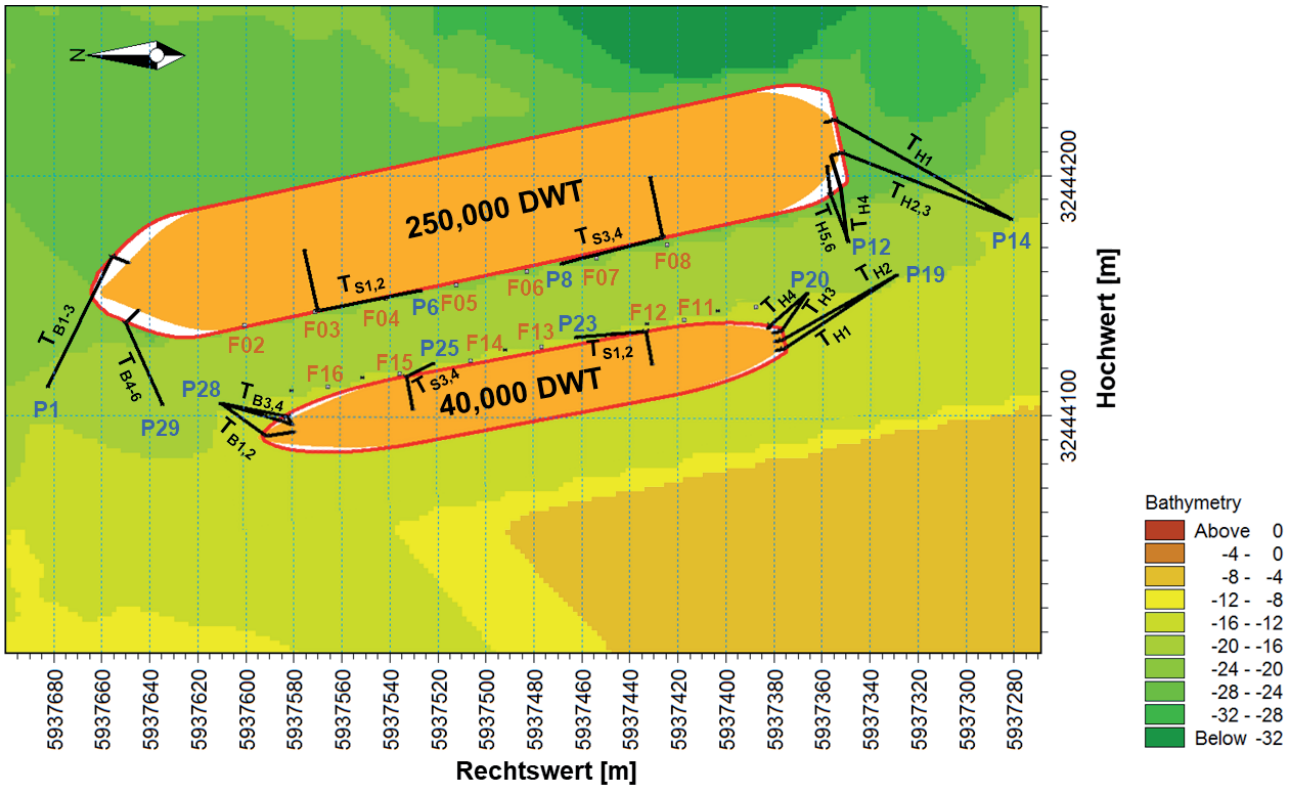


Abbildung 8: Beispielhafte Vertäuanordnung an der Niedersachsenbrücke in Wilhelmshaven (Koordinaten in ETRS 1989 UTM 32N), “F” = Fender, “P” = Poller, “T” = Vertäuleine (nach Albrecht, 2011).

Es wurde eine Untersuchungsmatrix bestehend aus 22 Szenarien gebildet. Die Szenarien beinhalten Kombinationen aus Wind, Strömung, Wellen und vorbeifahrenden Schiffen. Die Auswertung der AIS-Daten ergab einen minimalen Passierabstand von 200 m (ankommend). Für die Schiffsvorbeifahrt wurde ein 166,7 m langer und 25 m breiter Massengutfrachter mit 14 m Tiefgang und einer Geschwindigkeit von 8 Knoten (Meyer, 2017) angesetzt. Die Methodologie entsprach dabei der in Abbildung 4 dargestellten.

Die kritischsten Umweltbedingungen stellten Westwind mit Geschwindigkeiten von 32,4 m/s, Wellen mit einer signifikanten Höhe von H_S = 1,6 m und einer Peak-Periode von T_p = 4,5 s aus Ost-Nordost sowie Ebbströmung mit einer Geschwindigkeit von u = 0,9 m/s dar. Die Wind-induzierten Wellen wurden mit langperiodischen Wellen mit H_S = 0,5 m und T_p = 12 s aus Nord kombiniert. Die Wellen wurden durch Streu-Analysen von Zeitreihen ermittelt, die aus dem Northern Europe Hindcast (1979-2016) von DHI extrahiert wurden. Die Daten sind von https://www.metocean-on-demand.com/ verfügbar.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen wurden die folgenden Schlussfolgerungen gezogen:

- Die höchsten Lasten treten in den Spring-Leinen auf, während die Tideströmung auf das Schiffsheck zuläuft
- Die Wellenbelastung ist aufgrund der kurzen Perioden der Windinduzierten Wellen sowie der Anlegerausrichtung klein, woraus sich auch ein kleiner Anlaufwinkel für die langperiodischen Wellen ergibt
- Die höchsten Pfahlzugkräfte treten bei Westwind am äußeren Anleger auf (ähnlich wie bei den vorangegangenen Studien)
- Die zu erwartenden Kräfte aus Schiffsvorbeifahrt sind klein.

Es konnte bestätigt werden, dass die Konstruktion des Massengutanlegers Niedersachsenbrücke sichere Vertäubedingungen für die untersuchten Schiffe unter den geänderten Strömungsbedingungen und dynamischen Bedingungen infolge Wellen und Schiffsvorbeifahrt bietet. Es waren keine baulichen Änderungen des Anlegers erforderlich.

5. Großschiffswarteplatz Finkenwerder Pfähle, Hamburg

Bereits seit mehreren Jahren dienen die Finkenwerder Pfählen als Warteplatz für zumeist tideabhängige Großschiffe, die den für sie vorgesehenen Liegeplatz zwischenzeitlich nicht anlaufen können. Er befindet sich im Bereich der Hafenzufahrt in Hamburg Finkenwerder und ist am Rande der Fahrrinne als vom Ufer losgelöster Dalbenliegeplatz ausgeführt. Ursprünglich für Panmax Schiffe entworfen, plant die Hamburg Port Authority (HPA) diesen Warteliegeplatz für die gestiegenen Dimensionen der aktuellen und zukünftigen großen Containerschiffe (ULCS) zu ertüchtigen. Hierbei wurden folgende Überlegungen berücksichtigt:

- Neuauslegung der Anlage für Bulker mit mind. 250 m und der nächsten Generation der ULCS (bis 450 m)
- Weiterverwendung der vorhandenen Pfähle
- Maßgeblich Berücksichtigung der Windlasten aufgrund gestiegener Windangriffsflächen. Die resultierenden Kräfte wurden in Windkanalversuchen für unterschiedliche Beladungszustände der ULCS ausgewertet
- Untersuchung verschiedener Vertäukonfigurationen für die ULCS
- Bewertung der Fenderkräfte an bestehenden Anlegedalben für auflandige Windsituationen
- Verbesserte Nutzung des bestehenden Liegeplatzes durch ergänzende Dalben.

Der Ansatz gängiger Normen und Richtlinien (z.B. EAU 2012) hätte zu einer Überbemessung der Lasten geführt und eine große Anzahl an zusätzlichen Dalben erfordert. Da die Warteliegeplätze hauptsächlich von ULCS genutzt werden, spielen Wind und Strömung eine wichtige Rolle bei der Bemessung. Aus diesem Grund entschied die HPA das dynamische Vertäuprogramm von DHI zu verwenden, um die operationellen Grenzen des bestehenden Dalbenliegeplatzes zu ermitteln und einem Schaden der Infrastruktur durch Überlastung vorzubeugen. Zusätzlich wurden anhand einer auf den dynamischen Berechnungen aufbauenden Variantenuntersuchung ergänzende Dalben zur Abdeckung kritischer Lastsituationen positioniert.

5.1 Ausgangssituation

Aufgrund seiner begrenzten Länge ist aktuell die Vertäuung von ULCS am Großschiffsliegeplatz nur eingeschränkt möglich. Pro Liegeplatz stehen nur zwei Vertäudalben zur Verfügung, die die Bug- und Heckleinen von Schiffen mit einer LüA von 400 m aufnehmen können. Wegen der begrenzten Anzahl an Vertäuhaken, jeweils 4 Stück pro Dalben, können nur 4 Vorder- bzw. Heckleinen und je 2 Springleinen ausgebracht werden (siehe Abbildung 9). Generell ist die Vertäuung der ULCS jedoch darauf ausgelegt, mindestens mit 6 Vorder- bzw. Heckleinen festzumachen.

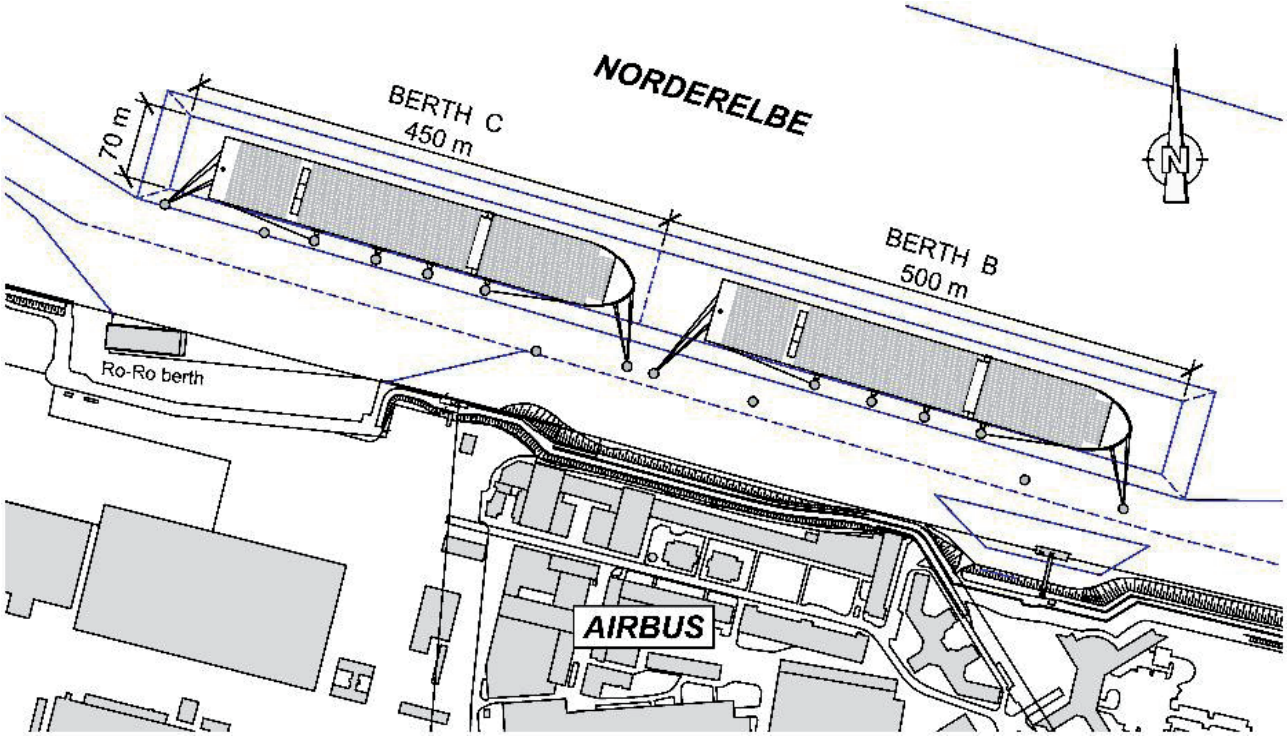


Abbildung 9: Bestehende Festmacherdalben in Finkenwerder, Hamburg

5.2 Randbedingungen

Zu Beginn wurden die in die Berechnung einfließenden Parameter für eine Erweiterung der Festmacherdalben definiert. Diese sind durch die Landebahn sowie dem Ro-Ro-Anleger des nahegelegenen Airbusgeländes geometrisch begrenzt. Die Höhe und Abmessungen der neu geplanten Dalben (Länge/ Durchmesser) müssen sich an denen der vorhandenen Dalben orientieren.

Für die Berechnung der Vertäukräfte an den Liegeplätzen wurden vier Bemessungsschiffe definiert. Hierbei ist die Größenentwicklung der Containerschiffe in den letzten Jahren berücksichtigt worden: kleinere Feederschiffe (8.000 TEU, LüA = 335 m); aktuelle Containerschiffgrößen (15.000 - 19.000 TEU, LüA = 400 m) und zukünftige ULCS - Klassen bis 24.000 TEU (LüA = 450 m).

Die lokalen, richtungsabhängigen Windgeschwindigkeiten wurden durch den Deutschen Wetterdienst in einem Windgutachten ermittelt. Es enthält eine statistische Analyse der 2%-igen Überschreitungswahrscheinlichkeit (50-Jahreswind) in einer Höhe von 10 m über dem Boden. Die Diskretisierung des Windsektors betrug 30°.

Im Flächenschwerpunkt der Bemessungsschiffe wurde eine höhengemittelte Windgeschwindigkeit angesetzt. Dabei betrug die durchschnittliche Höhe über der Wasserlinie (HüWL) 64 m. Abweichungen zwischen den unterschiedlichen Bemessungsschiffen hatten hier keinen signifikanten Einfluss auf die ermittelten Windlasten (< 3 %). Die der Berechnung zugrunde gelegten Windgeschwindigkeiten sind in Tabelle 4 aufgeführt. Der lokale Abschattungseffekt der Airbus Gebäude auf den Dalbenliegeplatz B ist an den geringeren Windgeschwindigkeiten für die südwestlichen Sektoren 120° - 270° zu erkennen.

Richtung		30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	360°	0°-360°
LP B [1]	$V_{w,2\%}$ [m/s]	22,1	25,6	27,9	15,1	11,6	13,9	22,1	23,2	32,5	33,7	17,4	15,1	34,9
LP C [2]	$V_{w,2\%}$ [m/s]	22,1	25,6	27,9	20,9	16,3	18,6	27,9	32,5	33,7	33,7	17,4	15,1	34,9

1) LP B = Liegeplatz B; 2) LP C = Liegeplatz C

Tabelle 4: Lokale, höhengemittelte Windgeschwindigkeiten (m/s) mit einer Wiederkehrperiode von 50 Jahren (30° Sektoren, Durchschnittshöhe der Bemessungschiffe 64 m).

Tabelle 5 zeigt die Mindestanforderungen für Leinen und Winden. Die hier angegebenen Werte basieren auf einer Umfrage der Hamburger Hafenlotsen und den Erfahrungen des Oberhafenamtes.

Bezeichnung	Bulker	Handy New Panamax	New Panamax	Post New Panamax	Post New Panamax Plus [2]
Schiffstyp	Bulker	Container	Container	Container	Container
Baujahr (ab)	-	2000	2008	2006	ZUKUNFT
DWT/ TEU	230.000 T	8.000-12.000	12.001-14.500	14.501-21.500	21.501 +
Material der Leinen[1]	PP/PE oder PA	PP/PE oder PA	PP/PE oder PA	PP/PE oder PA	PP/PE oder PA
min. Leinenanzahl (ausgelegt)	12 (4,2 vertäut)	8 (3,1 vertäut)	12 (4,2 vertäut)	16 (6,2 vertäut)	22[3] (8,3 vertäut)
Minimum Breaking Load MBL	siehe New Panamax	90 t	110 t	130 t	150 t
zul. Regelbeanspruchung PA =45% / PP/PE =50%	siehe New Panamax	40,5 t/ 45 t	49,5 t/ 55 t	58,5 t/ 65 t	67,5 t/ 75 t
SWL Winden (≈ min MBL)	siehe New Panamax	90 t	110 t	130 t	150 t
Designlast Bremse (≈ 80% MBL)	siehe New Panamax	72 t	88 t	104 t	120 t

1) PP/PE = Polypropylene/ Polyester; PA = Polyamid (Nylon)
2) Werte basieren auf Grundlage von [4] und Abschätzungen
3) Annahme auf Basis einer Lastabschätzung

Table 5: Mindestanforderungen der Leinen und Winden für die ausgewählten Bemessungsschiffe

Gewählte Bemessungsparameter für die Vertäuberechnung

Es wurde angenommen, dass standardmäßig 16 Nylonleinen beim Festmachen ausgebracht werden (6-2-Vertäuung). Die Bruchlast (MBL) der Festmacherleinen liegt mit 150 t über dem Mindestwert von 130 t. Die Safe Working Load (SWL) einer Mooringwinde entspricht in der Regel der MBL der verwendeten Leinen.

Als zulässige Leinenspannung bei Nylonleinen wurden 45 % der MBL angesetzt. Dies entspricht 67,5 t für eine Einzelleine bzw. 135,0 t für eine Doppelleine.

Aufgrund der vorgegebenen Bemessungssituation (Sturm) ist davon auszugehen, dass diese Grenzwerte für die Leinen nicht eingehalten werden. Da im Sturmfall vorgegeben wird die Winden „auf Bremse“ anstatt im Automatikbetrieb zu fahren, sollten andere Grenzwerte als die empfohlene Regelbeanspruchung der Leinen herangezogen werden.

Für die Einordnung der Ergebnisse wurde in der Auswertung als Grenzwert 80% der minimalen Bruchlast (MBL) der Leinen angenommen, um bei einer angestrebten Belegung „auf Bremse“ noch 20% Reserve im Reck der Leinen zu haben. Für das 19.000 TEU-Schiff wurde abweichend ein Grenzwert entsprechend der Designlast der Windenbremse von 120 t x 80 % = 96 t (bzw.192 t bei Doppelwinden) angesetzt. Dieser Grenzwert deckt sich mit der Designlast der bestehenden Sliphaken von 1.000 kN (= 100 t) je Haken. Zudem entspricht die Designlast der Windenbremse (96 t) bezogen auf die angegebene MBL von 150 t einem Ausnutzungsgrad von 64 %. Somit ist in den Leinen eine Lastreserve von min. 36% vorhanden.

5.3 Handlungsempfehlung

Aus den Untersuchungen ergaben sich folgende Handlungsempfehlungen für den Betrieb der Liegeplätze B und C des Großschiffswarteplatzes Finkenwerder:

1. Ab einer Windstärke von 6 Bft. ist mit zunehmend starken Bewegungen des Schiffes zu rechnen. Diese Information ist an die Kapitäne weiterzugeben.
2. Zusätzliche Leinen können für den Sturmfall auf Pollern an Deck belegt werden. Dies stellt nur eine Übergangslösung dar und ist mit entsprechender seemännischer Sorgfalt durchzuführen, da die Leinen mit Hilfe des Spillkopfes „manuell" durchgeholt und gefiert werden müssen. Erfolgt dies nicht, können bei variierender Tide Leinen zu lose fallen oder unter hoher Spannung stehen. Dies führt zu einem ungleichmäßigen und ungünstigen Tragverhalten der Leinen.
3. Sollten Schiffe nicht ausreichende Leinen (Anzahl oder MBL) mit sich führen oder aufgrund der entstehenden Schiffsbewegungen Unsicherheit bestehen, ist im Zweifelsfall ab einer Windstärke 8 aus süd- bis südwestlichen Richtungen von den verantwortlichen Kapitänen eine Schlepperassistenz anzufordern, damit eine Überschreitung des Ausnutzungsgrads der Leinen von 80% MBL nicht eintritt.

5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse Finkenwerder Pfähle

IST-Situation

Die Ergebnisse der Vertäustudie zeigen, dass die bestehende Anlage der Finkenwerder Pfähle bereits für die aktuellen Schiffsgenerationen mit einer Schiffslänge von 400 m nicht ausreichend dimensioniert ist. Die mitgeführten 6 bis 8 Vor- bzw. Achterleinen können aus geometrischen Gründen nicht auf den vorhandenen Dalben festgemacht werden. Hierdurch fehlen in der IST – Situation aktuell mind. zwei Vertäudalben.

Die Auswertung der Leinenlasten und Dalbenkräfte zeigen, dass für die Bestandssituation mit Abschattungseffekten der Airbushallen am Liegeplatz B die 4,2 Vertäuung eines 19.000 TEU Schiff ausreicht, um es im Sturmfall zu halten. Ebenso werden die zul. horizontalen Lasten am Dalbenkopf von rd. 3.000 kN nicht überschritten. Bei ablandigem Wind ab einer Stärke von 6 Bft kann der Kontakt mit den Anlegedalben verloren gehen.

Für den angesetzten Bemessungswind ohne Abschattungseffekte der Airbushallen ist die 4,2 Vertäuung eines 19.000 TEU Schiff an beiden Liegeplätzen nicht ausreichend. Die ausgebrachten Leinen überschreiten deutlich die angesetzte Dauerbeanspruchung von 45 %-MBL und erreichen zum Teil sogar die MBL. Ebenso werden die horizontalen Lasten am Dalbenkopf verdoppelt (rd. 6.000 kN). Die horizontalen Schiffsbewegungen (Wogen, Schwoien und Gieren) erreichen unakzeptable Werte (Schwoien von rd. 8 m).

Ausbau für 400 m Schiffe

Die Vorzugsvarianten für beide Liegeplätze zeigen, dass im Falle einer Neubemessung ohne Windabschattung für das 19.000 TEU-Schiffe an beiden Liegeplätzen zwei bzw. drei zusätzliche Vertäudalben vorzusehen sind, um ein Festmachen mit einer 8-2-Vertäuung (bzw. 6-2-Vertäuung am Liegeplatz B) im Sturm zu gewährleisten, siehe Abbildung 10. Alle Dalben sind für eine zul. horizontale Last von circa 3.500 kN zu bemessen.

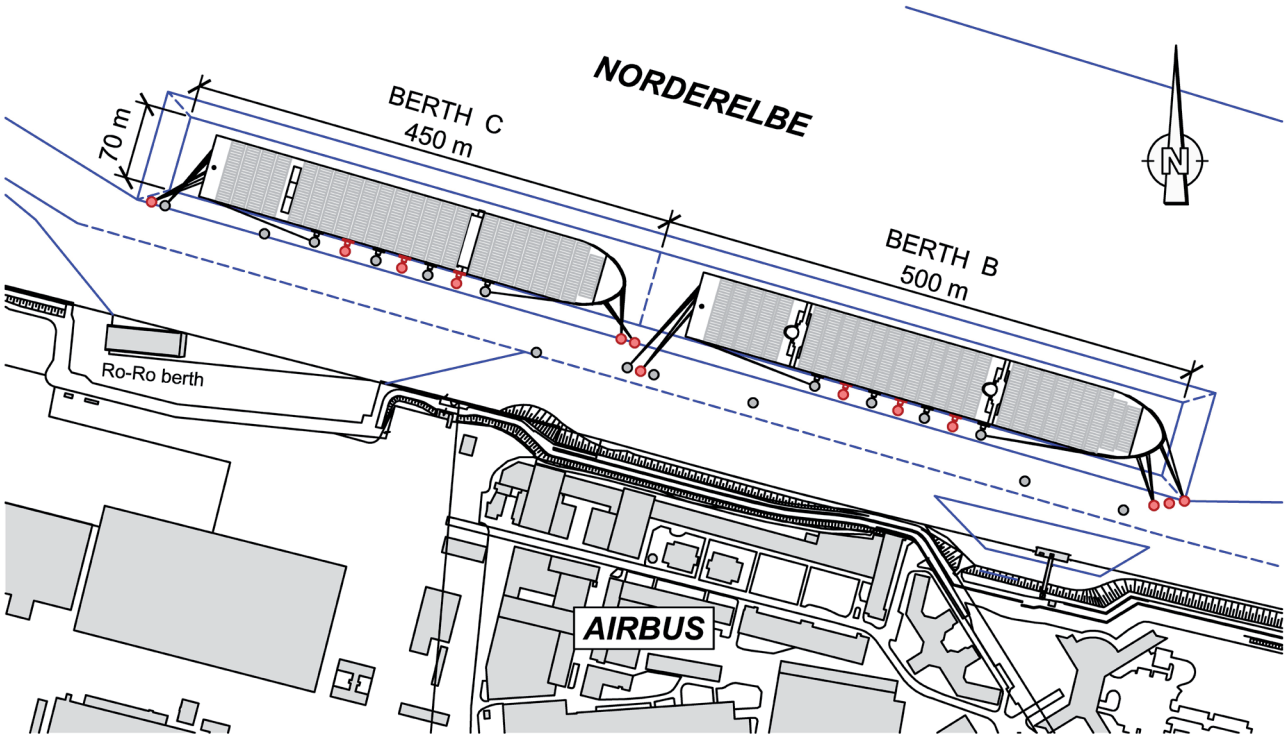


Abbildung 10: Ergänztes Layout der Liegeplätze in Finkenwerder, Hamburg

Die Lasten der Springleinen auf die Poller der Anlegedalben überschreiten den zulässigen horizontalen Zug pro Dalben zu keiner Zeit. Das Anlegesystem (Fender und Dalbenfederung) kann für Schiffe bis 400 m Länge Winddruckkräfte von 2800 kN aufnehmen. Aufgrund der ergänzten Anlegedalben sind Lastreserven vorhanden und es kommt zu einer Umlagerung der Auflagerlasten. Zudem begünstigen diese zusätzlichen Anlegedalben die „Liegesituation“ für Containerschiffe mit kleinen Anlegeflächen.

Die überschlägliche Lastermittlung für die weiteren Bemessungsschiffe hat bestätigt, dass kleinere Schiffe (Bulker, Handy New Panamax), die per se eine geringere Windangriffsfläche haben und weniger Leinen mitführen, nicht Bemessungsrelevant sind. Im Sturmfall können diese auch mit einer geringeren Anzahl an Leinen festgemacht werden (z.B. 4-2-Vertäuung). Hierbei ist darauf zu achten, dass die verwendeten Leinen die auftretenden Lasten abtragen können.

Zukünftige Schiffsgenerationen – Abschätzung wurde durch Berechnung bestätigt

Für die zukünftige Schiffsgeneration (Post New Panamax Plus – Beispielschiff „Tomorrow“) mit Windangriffsflächen über 20.000 m² werden die Lasten in den Leinen und an den Vertäudalben vereinfacht angenommen um ca. 30 % steigen. In diesem Fall ist davon auszugehen, dass das Schiff mindestens mit einer 8-3-Vertäuung festgemacht wird.

Nachrechnungen für das 24.000 TEU Schiff bestätigen die oben genannten überschläglichen Werte. Aufgrund der Überschreitung der zul. Horizontallasten am ersten Dalben des Liegeplatz B ist für den Fall eines Ausbaus für Schiffe mit einer LoA > 400 m mindestens ein weitere Vertäudalben einzuplanen. Dies ist auch im Hinblick auf die voraussichtlich steigende Leinenanzahl (ca.12 4 Vertäuung) zu berücksichtigen.

Die voraussichtliche Steigerung der Leinenanzahl aufgrund der Schiffsgrößenentwicklung wird, wie in Tabelle 5 dargestellt, auch zu einer Erhöhung der MBL der verwendeten Leinen führen. Wie die Ergebnisse der dynamischen Berechnung gezeigt haben, wird dies die bestehenden Sliphaken an die Grenze ihrer Gebrauchslast bringen.

Durch die dargestellte Herangehensweise wurde ein kompletter Ersatzneubau vermieden.

6. Zusammenfassung

Dieser Artikel fasst drei Anwendungen dynamischer Vertäuanalysen zusammen, bei denen die Sicherheit von Liegeplätzen neu bewertet wurde, um Schiffsgrößen und –formen die nicht in Richtlinien behandelt werden, sicher zu vertäuen. Der mathematische Hintergrund wird kurz beschrieben und die wichtigsten Annahmen werden umrissen. Das Beispiel dynamischer Vertäuanalysen für das Offshore-Terminal Bremerhaven zeigte die Fähigkeit der angewandten Methoden, die Auswirkungen von

vorbeifahrenden Schiffen in beengten Gewässern zu bewerten. In Wilhelmshaven wurde eine bestehende Pfeilerstruktur unter wechselnden Bedingungen und zusätzlich unter dynamischen Wellenlasten erneut analysiert und optimiert. Im Vergleich zu statischen Methoden überprüfte die detailliertere dynamische Methode die Sicherheit der vorhandenen Strukturen auch unter dynamischen Bedingungen. Empfehlungen für mehr Sicherheit wurden abgeleitet. In Hamburg wurde die Methode auf die größten Containerschiffklassen angewendet. Die Analyse ergab notwendige Änderungen am bestehenden Liegeplatz. Darüber hinaus wurden Handlungsempfehlungen für den Betrieb gegeben.

In allen Anwendungen führen dynamische Vertäuanalysen zu einem besseren Verständnis der Prozesse, was in der Folge weniger konservative Konstruktionen ermöglicht. Dadurch kann das angewandte Verfahren zu einer verbesserten Sicherheit bei der Vertäuung und reduzierten Baukosten an den Liegeplätzen führen.

7. Referenzen

Albrecht, H. (2011): “Niedersachsenbrücke in WHV. Neue Slipgeschirre P30 und P31 auf der Umschlagbrücke. Nachweise der Vertäusysteme”

Babarit, A., Delhommeau, G. (2015): “Theoretical and numerical aspects of the open source BEM solver NEMOH” LHEEA CNRS UMR 6598, Ecole Centrale de Nantes, France.

Bingham, H.B. (2000): “A hybrid Boussinesq-panel method for predicting the motion of a moored ship”, Coastal Engineering, 40., 21-38.

Brüning, A., Stoschek, O., Spinnreker, D., Kraus, U. (2014): „Assessing mooring forces at an offshore wind terminal, Bremerhaven, Germany”, PIANC World Congress, San Francisco, USA.

CES (2002): “Gutachterliche Stellungnahme zu Vertäusystemen für Massengutfrachter der 190.000 dwt-Klasse“, in co-operation with tewis AG.
DHI (2017): „MIKE 21 Flow Model & MIKE 21 Flood Screening Tool-Hydrodynamic Module, Scientific Documentation”, Hørsholm, Denmark.

DHI (2018): “MIKE 21 Maritime – Frequency Response Calculator and Mooring Analysis, Scientific Documentation”, Hørsholm, Denmark, (in review).

EAU (2012): “Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen: Hafen und Wasserstraßen“, 11th Edition, Ernst & Sohn.

Meyer, M. (2017): “Nautische Einschätzung Nr. 12102417“, Nautisches Büro Bremen, March 2017.

Newman, J.N. (1977): “Marine Hydrodynamics” MIT Press, Cambridge, MA, USA.

PIANC (1995): „Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours, A Practical Guide” Report of Working Group no. 24, Supplement to Bulletin no. 88, 1995.

Salzgitter Consult (1989): “Studie über den Ausbau der Niedersachsenbrücke in Wilhelmshaven zur Abfertigung von vollabgeladenen Massengutfrachtern bis 250.000 dtw Tragfähigkeit“, November 1989.

Voss, L. (2008): „Statische Berechnung. Verbundwand Niedersachsenbrücke Teil 1: Grundlagen und Schnittgrößenermittlung für die Spundwand.“

Strombaumaßnahmen für Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft

Dr. Kirsten Wolfstein[1], Dr. Boris Hochfeld[1] & Dr. Henrich Röper[1]

Keywords

Elbe Ästuar, Strombaumaßnahmen, Ökonomie und Ökologie, „Working with Nature“

Zusammenfassung

Die Unterhaltung der Fahrrinne innerhalb der Hamburger Landesgrenzen und des Hamburger Hafens stellt eine große Herausforderung für die Hamburg Port Authority (HPA) dar, da der starke Flutstrom große Mengen Sediment aus der Nordsee in das obere Ästuar und Hafengebiet transportiert („tidal pumping“). Dies führt nicht nur zu hohen Unterhaltungskosten für den Hafen, sondern beeinflusst auch die Umweltbedingungen der unter Naturschutz gestellten Gebiete des Elbeästuars. Der Umgang mit dieser Herausforderung erfordert die Entwicklung einer adäquaten Sedimentmanagementstrategie. In diesem Artikel werden die wichtigsten Bestandteile der aus mehreren Säulen bestehenden Strategie der HPA beschrieben. Eine der Säulen beinhaltet die Umsetzung von Strombaumaßnahmen, die den Transport von Sedimenten beeinflussen sollen, wie beispielsweise das Rückdeichungsprojekt „Kreetsand/Spadenlander Busch“. Eine weitere wichtige Komponente ist die Entwicklung einer Kommunikationsstrategie, welche zu einem besseren Verständnis beziehungsweise einer höheren Akzeptanz von Plänen und Maßnahmen durch betroffene Stakeholder und Anwohner führt. Dieser Artikel beschreibt (1) die wichtigsten Bestandteile der Sedimentmanagementstrategie von HPA, (2) die Durchführung und den aktuellen Status des Pilotprojektes „Kreetsand/Spadenlander Busch“ als Beispiel für den PIANC Ansatz „Working with Nature“ und informiert (3) über den Kommunikationsprozess im Rahmen der Ästuarpartnerschaft „Forum Tideelbe“. Letztere hat unter anderem das Ziel, eine Rangfolge weiterer Strombaumaßnahmen zu erstellen, die zu der Reduzierung des ästuarinen Sedimenttransportes beitragen sollen.

1. Einleitung

Der Hamburger Hafen ist als drittgrößter europäischer Hafen (gemessen in TEU) und wichtigstem deutschen Seehafen von herausragender Bedeutung für die deutsche Exportwirtschaft. Rund 21 Milliarden Euro Bruttowertschöpfung werden durch den Hafen jährlich bundesweit generiert, fast 270.000 Arbeitsplätze hängen von ihm ab. Seine Lage weit im Hinterland, ca. 100 km von der Nordsee entfernt, ermöglicht es, die Waren umweltfreundlich und günstig bis nah an die Märkte zu transportieren. Diese Lage hat allerdings den Nachteil, dass ein hoher Unterhaltungsaufwand der Fahrrinne und Hafenbecken nötig ist, bedingt durch den hohen Eintrag von marinen Sedimenten. Diese Sedimente gelangen durch den starken Flutstrom aus der Nordsee ins obere Ästuar und den Hafen und können durch den schwächeren Ebbstrom nicht zurück transportiert werden (Abb.1). Das Phänomen wird als „tidal pumping“ bezeichnet und hängt unter anderem damit zusammen, dass das Ästuar über die vergangenen Jahrhunderte kontinuierlich verändert wurde, sei es durch natürliche Umstände oder durch menschliche Eingriffe wie Landgewinnung, Fahrrinnenvertiefung oder Abtrennung von Nebenflüssen für den Hochwasserschutz.

In den Hafen werden jedoch nicht nur grobkörnige marine Sedimente transportiert, sondern auch mehr als 600.000 Tonnen feinkörnige Sedimente pro Jahr aus dem stromauf gelegenen Teil des Elbeeinzugsgebietes, die dort aufgrund natürlicher Erosionsprozesse mobilisiert werden. Der Transport und die Mischungsprozesse der zwei Sedimenttypen werden stark durch den Oberwasserabfluss gesteuert. Bei hohem Oberwasserabfluss werden die Sedimente in Richtung Nordsee transportiert, während sie bei niedrigem Oberwasserabfluss im oberen Ästuar und im Hafenbereich sedimentieren.

1 Hamburg Port Authority, Germany, kirsten.wolfstein@hpa.hamburg.de

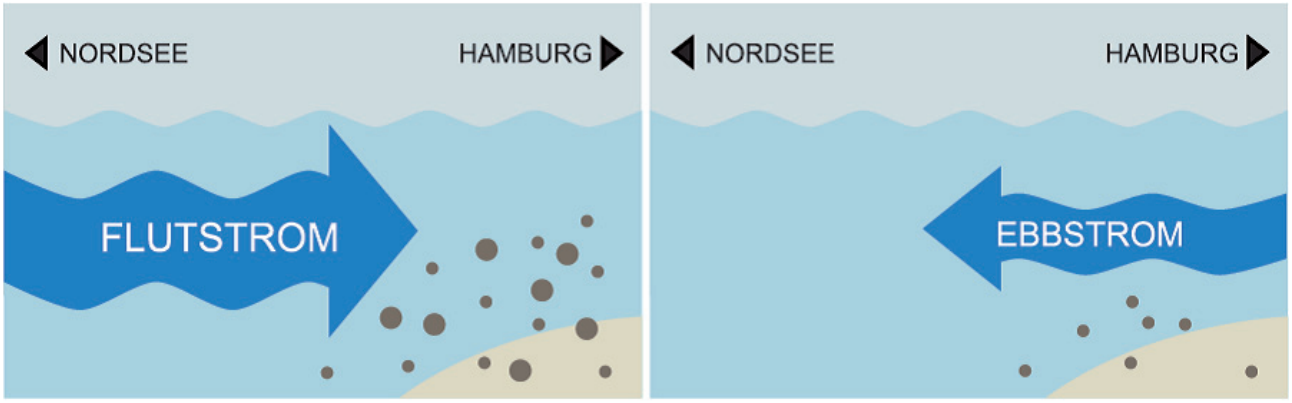


Abbildung 1: Der „tidal pumping Effekt": Ebbe (links), Flut (rechts).

Der "tidal pumping" Effekt resultiert letztendlich in steigenden Sedimentationsraten im oberen Ästuar und im Hafenbereich, besonders bei niedrigen Oberwasserabflüssen während der letzten vier Jahre. Er führt zu ungünstigen Bedingungen für Natur und Wirtschaft, d.h. hohe Unterhaltungskosten für den Hafen und eine Verschlechterung der Umweltbedingungen für die geschützten ästuarinen Habitate wie zum Beispiel die Flachwassergebiete.

Eine der Kernaufgaben der Hamburg Port Authority (HPA) ist die Bereitstellung ausreichender Wassertiefen für eine sichere Schifffahrt in den unter ihrer Verantwortung stehenden Gebieten, d.h. der Fahrrinne innerhalb des Hamburger Stadtgebietes und der Hafenbecken. Diese Aufgabe erfordert eine kontinuierliche und – in den letzten Jahren - vermehrte Baggerung und Verbringung der anfallenden Sedimente. Da das Ästuar nicht nur ein wichtiger seewärtiger Zugang zum Hafen, sondern auch ein wertvolles Naturgebiet ist, das durch nationale und europäische Umweltgesetze wie der Wasserrahmenrichtlinie oder FFH-Richtlinie (EU 1992, EU 2000) geschützt ist, operiert die HPA in einem komplexen Konfliktbereich zwischen (1) wirtschaftlichen Ansprüchen der Hafenkunden, (2) ökologischen Ansprüchen der geschützten Arten und Habitate sowie (3) gesellschaftlichen Interessen der zahlreichen Stakeholder. Daher hat die HPA als Antwort auf diese Herausforderungen eine Sedimentmanagementstrategie entwickelt, die unter anderem auch zu einem Rückgang der zu baggernden Sedimente beitragen soll.

Der Sedimenttransport kann beispielsweise durch Strombaumaßnahmen beeinflusst werden (Scott et al. 2011, www.tide-projcect.eu, Saathoff et al. 2013, PIANC 2018), welche die Tidenenergie und die Strömungsgeschwindigkeit reduzieren, indem mehr Raum für den Fluss geschaffen und die Rauigkeit der Flusssohle gesteigert wird. Gleichzeitig können diese Maßnahmen auch zu Vorteilen für Natur und Gesellschaft führen. Daher hat die HPA vor einigen Jahren mit der Planung und Konstruktion des Pilotprojektes "Kreetsand/Spadenlander Busch" begonnen, einer Rückdeichungsmaßnahme. Weil sie von verschiedenen Organisationen als Beginn von weiteren durchzuführenden Maßnahmen angesehen wurde, wurde im Dezember 2016 eine Ästuarpartnerschaft gegründet, in der alle relevanten Stakeholder entlang des Elbeästuars vertreten sind. Diese Partnerschaft hat als wichtigste Aufgabe, weitere geeignete Strombaumaßnahmen entlang der Tideelbe auszuwählen und den verantwortlichen Verwaltungen der Länder vorzuschlagen.

2. Ziel

Dieser Artikel präsentiert die wichtigsten Bestandteile der Sedimentmanagementstrategie der HPA, beschreibt kurz die Durchführung und den aktuellen Status des Pilotprojektes „Kreetsand/Spadenlander Busch" und informiert über den Kommunikationsprozess im Rahmen der Ästuarpartnerschaft „Forum Tideelbe".

Bereits 2008 haben die für die Unterhaltung des Elbeästuars verantwortlichen HPA und Wasserstraßenstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) ein Sedimentmanagement- und Strombaukonzept erstellt (HPA & WSV 2008) um der Herausforderung von ansteigenden Sedimentmengen, die gebaggert und verbracht werden müssen, zu begegnen. HPA hat diese Strategie für ihr Unterhaltungsgebiet weiterentwickelt. Sie besteht entsprechend der Kriterien „Qualität und Quantität" der Sedimente aus den drei Säulen „Sanierung", „Unterhaltung" und „Strombaumaßnahmen" sowie einer engen Zusammenarbeit mit den Stakeholdern der Tideelbe und (wissenschaftlicher und technischer) Innovation (Abb. 2).

Abbildung 2: Sedimentmanagementstrategie der HPA

(1) Die Säule „Sanierung” trägt der Tatsache Rechnung, dass sich nach der Wiedervereinigung Deutschlands zwar die Wasserqualität der Elbe stark verbessert hat, die Sedimente aber immer noch stark durch Schwermetalle und organische Stoffe, die aus Bergwerken, Industrie und Abwasserentsorgung der mittleren und oberen Elbe und den Nebenflüssen ihres internationalen Einzugsgebietes stammen, kontaminiert sind (Abb. 3). Abhängig vom Oberwasserabfluss werden diese meist feinkörnigen Sedimente in das Ästuar transportiert und sedimentieren in strömungsberuhigten Gebieten wie in den tiefen Hafenbecken oder gelangen letztendlich in die Nordsee. Allerdings dürfen Sedimente einer bestimmten Belastung aufgrund internationaler Übereinkommen wie der „London Konvention“, der „Oslo-Paris Konvention“ (OSPAR, https://www.ospar.org/) und der „Helsinki Konvention“ (HELCOM, www.helcom.fi/), deren Anforderungen in die nationale Regelung für Baggermaterial in ästuarinen und Küstengebieten eingegangen sind (GÜBAK), nicht aktiv im Elbeästuar oder in der Nordsee umgelagert werden. Des Weiteren führt die Umlagerung bzw. Behandlung von kontaminiertem Baggergut zu hohen Kosten für HPA. Daher haben die Stadt Hamburg und die HPA 11 Millionen € für das Projekt „ELSA“ (Schadstoffsanierung Elbsedimente) bereitgestellt. Es befasst sich mit der Identifikation und Behandlung bzw. Entfernung dieser Belastungen schon an deren Quellen im mittleren und oberen Flussgebiet der Elbe und soll dazu führen, dass weniger kontaminierte Sedimente das Ästuar und den Hafen erreichen.

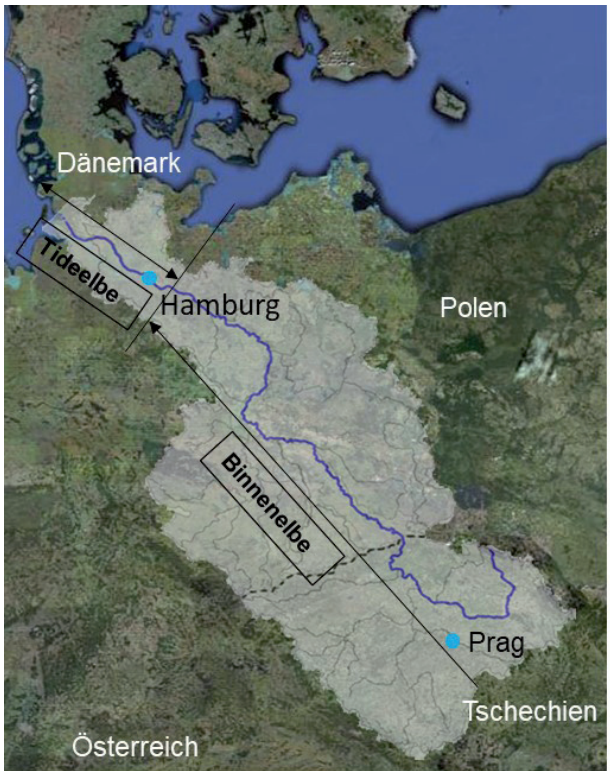


Abbildung 3: Einzugsgebiet der Elbe (Google maps, verändert)

(2) Die Säule „Sedimentmanagement“ beschreibt ein adaptives und flexibles Bagger- und Verbringkonzept. Die Mehrheit der gebaggerten Sedimente ist weniger stark kontaminiert und wird innerhalb des Ästuars noch auf Hamburger Stadtgebiet bei „Neßsand” umgelagert. Dies geschieht während der Ebbphase, in der der Ebbstrom die Sedimente Richtung Nordsee transportieren soll. Im Sommer, bei niedrigen Oberwasserabflüssen, und auch wegen ökologischer Beschränkungen, wird diese Umlagerstelle jedoch nicht genutzt. Aber auch im Winter werden bei ungewöhnlich niedrigen Abflüssen die Sedimente teilweise in den Hafen zurück transportiert und bewirken so einen kostspieligen Baggerkreislauf. Daher war die Ausweisung einer weiter vom Hafen entfernten Verbringstelle notwendig. Die HPA und das Land Schleswig-Holstein unterzeichneten eine Vereinbarung über die Verbringung einer begrenzten Menge von nur sehr geringfügig belastetem Sediment während der Sommermonate in die Nordsee. Stärker kontaminierte Sedimente werden an Land in der HPA eigenen Anlage „METHA“ (Mechanische Behandlung von Hafensedimenten) einer speziellen Behandlung unterzogen und anschließend verwertet oder auf Deponien beseitigt (Abb. 4).

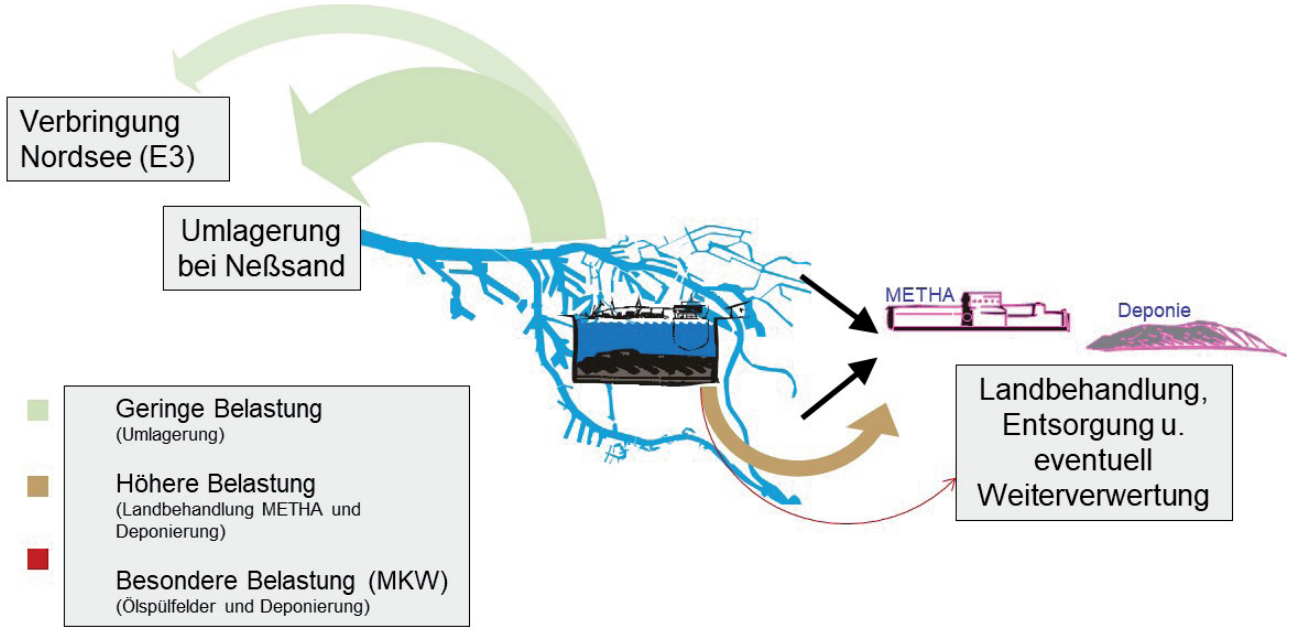


Abbildung 4: Optionen für Umlagerung und Behandlung von Baggergut der HPA

(3) Die Säule “Strombaumaßnahmen” zielt auf die Verbesserung ungünstiger hydromorphologischer Umstände ab, die eine hohe Tidenenergie und hohen Stromauftransport von Sedimenten begünstigen und letztendlich zu hohen Unterhaltungskosten aber auch zu ungünstigen Umweltbedingungen führen. Strombaumaßnahmen können gleichzeitig zu einer Reduktion der Tidenenergie und des Sedimentanfalls beitragen und die Umweltbedingungen für geschützte Arten und Habitate verbessern. Mit dieser Zielsetzung wurde auch das Pilotprojekt „Kreetsand/Spadenlander Busch” geplant und ab 2012 umgesetzt. Da in der Tideelbe nicht nur Ökonomie und Ökologie von großer Bedeutung sind, sondern auch die Interessen von vielen Stakeholdern, ist eine enge Zusammenarbeit mit diesen Stakeholdergruppen nötig, um die Akzeptanz für Sedimentmanagement und Strombaumaßnahmen zu fördern und Verzögerungen bei deren Umsetzung möglichst zu vermeiden. Daher haben die Stadt Hamburg und die HPA die Ästuarpartnerschaft „Forum Tideelbe” gegründet, in der die Interessen der Stakeholder bei der Suche nach weiteren geeigneten Maßnahmen vertreten werden.

(4) Die HPA ist der Auffassung, dass eine adäquate Kommunikationsstrategie wichtig ist, um Verständnis und Akzeptanz für Aktivitäten zu erzielen, die Stakeholder und Anwohner betreffen können, und um den Hafenkunden ihre Sedimentstrategie zu verdeutlichen.

(5) Die fünfte Komponente der Sedimentmanagementstrategie besteht daraus, innovative technische Ideen für Unterhaltung und Behandlung von Sedimenten zu entwickeln und wissenschaftliche Kenntnisse für ein besseres Verständnis des ästuarinen Systems aufzubauen. Dazu arbeitet die HPA mit nationalen und internationalen Wissenschaftlern und Institutionen zusammen und partizipiert in (inter)nationalen Gremien und Organisationen.

3. Pilot Projekt „Kreetsand/Spadenlander Busch“

Setup

Seit einigen Jahren werden besonders in den USA, den Niederlanden und Großbritannien (Scott et al. 2011, www.tide-projcect.eu, Saathoff et al. 2013, PIANC 2018) Strombaumaßnahmen wie Rückdeichungen durchgeführt, um die hydromorphologische Bedingungen im Wasserkörper zu beeinflussen. Diese Maßnahmen sollen zu Wiederherstellung und/oder Verbesserung der ökologischen Bedingungen beitragen und letztendlich zu Vorteilen für die Gesellschaft führen, die Bereitstellung der sogenannten „Ökosystemdienste“ (Hochwasserschutz, Festlegung von Nährstoffen, Schadstoffen und CO2, Regulierung von Erosion und Sedimentation, Bereitstellung von Erholungsgebieten, usw.; s. Millenium Assessment 2005). Bei der Ausführung von Strombaumaßnahmen sind in den letzten Jahren beispielsweise die Konzepte „Working with Nature” (PIANC 2018) immer bekannter geworden. Die Ziele von “Working with Nature” stimmen mit denen der “Building with Nature” Initiative der “EcoShape Foundation” und “Engineering with Nature” Initiative des US Army Corps of Engineers (PIANC 2018) überein.

Strombaumaßnahmen waren schon Bestandteil eines früheren Sedimentmanagementkonzeptes (HPA & WSV 2008), hauptsächlich um die Tidenenergie und die Sedimentmengen zu reduzieren. Es wurde jedoch deutlich, dass mit diesen Maßnahmen gleichzeitig positive Wirkungen für die Ökologie und die Gesellschaft erzielt werden können, sogenannte ´win-win´ Situationen. Die HPA startete 2008 ihre Planung für das Pilotprojekt „Kreetsand/ Spadenlander Busch”, und die Bauarbeiten begannen in 2012 (PIANC 2018). Die Maßnahme wurde im Bereich des Hamburger Stadtgebietes, im zwischen Norder- und Süderelbe gelegenen Stadtteil Wilhelmsburg, umgesetzt (Abb. 5). Dort wurde bereits 1999 eine Rückdeichung vorgenommen, allerdings ohne einen Anschluss des höher gelegenen Vorlandes an die Tideelbe vorzunehmen. Daher was das Gebiet bis zum Projektstart nicht durch die Tide beeinflusst.

Abbildung 5: Lage der Maßnahme (©Brockmann Consult & Waddensea Secretariat, verändert)

Die Maßnahme hat drei Zielsetzungen:

- Beitrag zur Reduktion der Tidenenergie durch Schaffung von ca. 1,1 Million m3 zusätzlichem Tidenvolumen.
- Schaffung von wertvollen natürlichen Habitaten wie Flachwasser-, Watt-, Schilf- und Auenwaldgebieten.
- Umwandlung von Teilen des Gebietes als Naherholungsgebiet für die Anwohner.

Ungefähr 47 Hektar des ehemaligen Spülfeldes sollten wieder an das Ästuar angeschlossen und unter Tideneinfluss gestellt werden (Abb. 6). Dabei sollten 17 Hektar als Land und 30 Hektar als Flachwassergebiet gestaltet werden. Während der Planung und der Konstruktion wurden die PIANC Richtlinien des "Working with Nature" Konzeptes (2018) angewandt. Es kombiniert soziale, ökologische und ökonomische Aspekte und stellt einen integrativen Ansatz für Projektentwicklung und – management dar, und soll zu ´win-win´ Situation für Navigations-Infrastrukturprojekten führen, indem natürliche Prozesse, ökologische Auswirkungen und Stakeholderbeteiligung beachtet werden, um die besten Ergebnisse für Navigation und Natur zu erreichen. Detaillierte Information zu Planung und Umsetzung der Maßnahme, die 2014 mit dem PIANC-Preis „Working with Nature" ausgezeichnet wurde, ist unter www.pianc.org und in PIANC (2018) zu finden.

Abbildung 6a & b: "Kreetsand/Spadenlander Busch" vor (© osp urbane landschaften) und während der Arbeiten in 2017 (© Holger Weitzel)

Nach der für 2020 geplanten Fertigstellung der Maßnahme werden Erosions- und Sedimentationsprozesse für eine natürliche Entwicklung der verschiedenen Habitattypen sorgen. Da aufgrund der Lage eine Aufsedimentation zu erwarten ist, wird das Flachwassergebiet voraussichtlich alle fünf Jahre unterhalten werden müssen, um überschüssige Sedimente zu entfernen. Die Entwicklung der Maßnahme wird in den ersten sechs Jahren durch ein jährlich stattfindendes Monitoring begleitet werden, welches danach auf alle sechs Jahren reduziert werden wird. Das Monitoring wird Untersuchungen der Topographie bzw. Bathymetrie sowie der Habitate umfassen. Außerdem wird die Entwicklung der geschützten Arten untersucht werden. Um die Auswirkungen des Pilotprojektes auf Tideparameter und Sedimentation zu erfassen, ist es nötig die Ergebnisse in Bezug zu Monitoringergebnissen vom übrigen Ästuar zu setzen.

Ökosystemleistungen

Mittlerweile wird weltweit anerkannt, dass die Bereitstellung natürlicher Ressourcen durch natürliche Ökosysteme direkt oder indirekt Vorteile für die Gesellschaft bedeuten, beispielsweise für Wirtschaft, Gesundheit oder menschliches Überleben (Millennium Ecosystem Assessment 2005). Die Fähigkeit von Ökosystemen über ihre Strukturen, Funktionen und biogeochemische Kreisläufe essentielle ökologische Prozesse zu regeln, generiert viele sogenannte Ökosystemdienste (Rönnbäck et al. 2007).

PIANC richtete 2016 eine Arbeitsgruppe ein, die den Ökosystemleistungsansatz für aquatische Transportinfrastrukturprojekte anwenden sollte (WG195, *An Introduction to Applying Ecosystem Services for Waterborne Transport Infrastructure Projects,* http://www.pianc.org/envicomactivewg.php).

Im Rahmen des europäischen Interreg IVb Projektes „TIDE" (*Tidal River Development*, http://www.tidetoolbox.eu/), wurde der Ökosystemdienstleistungsansatz angewandt, um den Erfolg von (Strombau) Maßnahmen in den vier europäischen Ästuaren Elbe, Humber, Schelde und Weser zu evaluieren. Diese Bewertung stellte ein erstes Screening der möglichen Bereitstellung von Ökosystemdiensten aufgrund der durchgeführten Maßnahmen dar. Sie baute auf der Bedeutung verschiedener Habitatty-

pen für die Lieferung bestimmter Ökosystemdienste auf, wobei das Ergebnis von Größe und Qualität der verschiedenen Habitattypen abhing, die durch die Maßnahme geschaffen wurden (das heißt Änderung der Habitatfläche und – qualität). So generiert eine Maßnahme einen positiven Effekt auf die Bereitstellung eines Ökosystemdienstes, wenn durch sie Habitattypen höherer Wertigkeit geschaffen werden (Abb. 7), wie im Fall "Kreetsand/Spadenlander Busch" wo durch die Abgrabung einer rückgedeichten Ruderalfläche wertvollere ästuarine Habitate entstehen. Darüber hinaus kann dieser Maßnahmentyp im Prinzip auch weitere Ökosystemdienste liefern (z.B. Hochwasserschutz) oder zur Steigerung der Biodiversität beitragen.

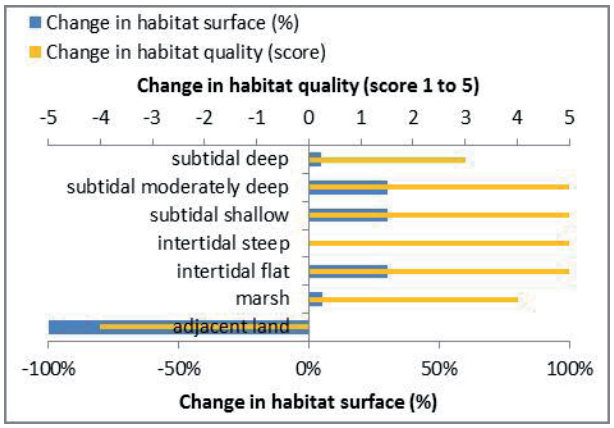


Abbildung 7: Analyse der Ökosystemdienste "Kreetsand/ Spadenlander Busch": Änderung von Habitat Oberfläche und Qualität, vor und nach Maßnahmenumsetzung (aus http://www.tide-toolbox.eu/pdf/measures/Measure_Spadenlander_Busch.pdf)

Das erste Entwicklungsziel der Maßnahme war für HPA natürlich die „Regulierung von Wassermengen: Abschwächung von Tidenenergie". Allerdings ergab die Bewertung, dass die erwarteten positiven Auswirkungen der Maßnahme auf dieses Projektziel aufgrund der relativ kleinen Fläche geringer sein werden als ursprünglich bei den Planungen angenommen. Aber die Evaluierung ergab auch, dass nach Fertigstellung der Maßnahme weitere Vorteile für die Natur und Gesellschaft erzielt und positive Effekte für die Bereitstellung folgender Ökosystemdienste auftreten werden:

- Biodiversität,
- Kulturelle Dienstleistungen: Inspiration für Kultur, Kunst und Design; sowie Information für kognitive Entwicklung,
- Regulierende Dienstleistungen: Erosion und Sedimentation (Regulation durch Wasserkörper).

4. Kommunikation

Während der letzten Jahre wurde die Bedeutung einer Stakeholderbeteiligung als Bestandteil erfolgreichen Projektdesigns und -umsetzung immer sichtbarer, da die Umsetzung einiger Projekte aufgrund fehlender Unterstützung oder sogar Proteste betroffener Stakeholder und Anwohner Verzögerungen erfuhr, beispielsweise „Stuttgart 21" (https://en.wikipedia.org/wiki/Stuttgart_21).
Mittlerweile ist die Wichtigkeit der Stakeholderbeteiligung nicht nur weitverbreitet anerkannt, sondern wird auch durch die Umweltgesetzgebung gefordert (US National Environmental Policy Act 1970, EU 1992, EU 2000). Sie ist auch ein wichtiger Bestandteil des „Working with Nature" Ansatzes (PIANC 2018). Die Entwicklung und Anwendung eines Kommunikationskonzeptes bzw. Konsultationsprozesses als Strategiebestandteil erwies sich als erfolgreich für die HPA, erstens für die Umsetzung des Pilotprojektes "Kreetsand/Spadenlander Busch" und zweitens für die Entwicklung und Umsetzung der Sedimentmanagementstrategie.

"Kreetsand/Spadenlander Busch"

In dem Pilotprojekt „Kreetsand/Spadenlander Busch" wurden Stakeholder, u.a. Anwohner, Behörden und Umweltverbände von Planungsbeginn an, das heißt seit 2008, in die Pläne von HPA involviert und gebeten, sich einzubringen und Rückmeldungen zu geben. HPA organisierte einen Informationsaustausch inklusive Beteiligungsprozess für die Anwohner, zum einen um das Projekt vorzustellen, und zum anderen um die Wünsche und Bedenken der Anwohner besser zu verstehen. Ein erster Informationsabend fand bereits vor Planungsbeginn statt. Im weiteren Projektverlauf informierte das Projektteam die Anwohner über den Stand der Arbeiten und erhielt Rückmeldungen auf die Arbeiten der verschiedenen Projektstadien. Am Ende des Planungsprozesses präsentierte das Projektteam einen Überblick über die Planungsstufen, die Bewertung der verschiedenen möglichen Projektausgestaltungen und Ergebnisse der Modellierung. In der Planungs- und Genehmigungsphase erfolgte eine Zusammenarbeit mit den NGOs und den Behörden um mögliche Probleme zu identifizieren, die die Projektumsetzung behindern könnten. Mehrere Treffen mit den NGOs trugen dazu bei, die Genehmigungsphase zu beschleunigen, da sie auf diese Weise gut informiert waren und ihre Bedenken angesprochen wurden. Während der Konstruktionsphase wurden die komplexen Prozesse und ästuarinen Zusammenhänge, wie beispielsweise Tidendynamik, auf Postern in der sogenannten „Deichbude", einer auf dem Deich erbauten Informationshütte, erklärt. Letztendlich ist geplant, einen „Tidepark" anzulegen, in dem die tidenbeeinflusste Landschaft und grundsätzliche Tidephänomene für eine breite Öffentlichkeit erlebbar werden.

Sedimentmanagementstrategie der HPA

Die Bundesländer, inklusive die drei Stadtstaaten Berlin, Bremen und Hamburg, haben eine durch die Verfassung garantierte Souveränität für ihr Territorium. Für die Verwaltung des Elbeästuars resultiert dies in mehreren Verantwortlichkeiten (Abb. 8). Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) gehört zum Ressort des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und ist im Allgemeinen verantwortlich für die Bundeswasserstraßen wie die Elbe – mit einer Ausnahme: das Management der Elbe im Bereich der Stadt Hamburg wurde schon vor Jahrzehnten an die Stadt Hamburg übertragen und wird durch die HPA praktisch ausgeführt. Die Bundesländer Schleswig-Holstein und Niedersachsen kümmern sich um die Verwaltung der Ufer des Ästuars, sind aber ebenso für die Umsetzung von europäischer Umweltgesetzgebung in den Wasserkörpern der Elbe und der Küstenzone der Nordsee zuständig (EU 1992, EU 2000).

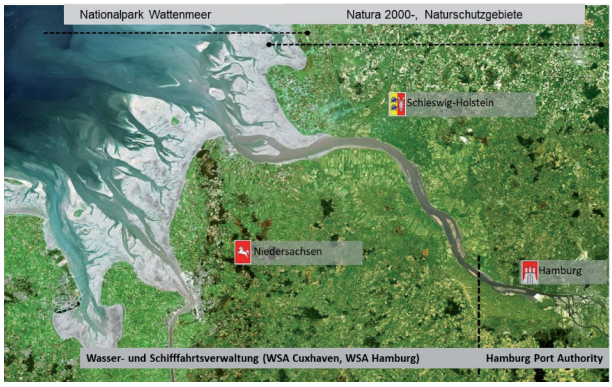


Abbildung 8: Verschiedene Verwaltungszuständigkeiten (© Brockmann Consult & Waddensea Secretariat, verändert)

Wie bereits beschrieben, war die HPA vor einigen Jahren auf der Suche nach einer weiteren Verbringstelle in der Tideelbe oder in der Nordsee, um die Verbringstelle Neßsand zu entlasten und um den Rücktransport von Sedimenten in das obere Ästuar und den Hafen zu erschweren. Aufgrund der politischen und verwaltungstechnischen Bedingungen benötigt die HPA für die Verbringung von Baggergut in ästuarine oder marine Gebiete, die sich nicht auf dem Territorium der Stadt Hamburg befinden, die Zustimmung des Umweltministeriums des zuständigen Bundeslandes. Außerdem haben diverse Stakeholdergruppen einen gewissen Einfluss auf die zuständigen Behörden ihrer Bundesländer. Daher haben die HPA und die WSV im Jahr 2014 das sogenannte „Dialogforum Tideelbe“ gegründet, in dem alle relevanten Stakeholder vertreten waren (Fischer, Umwelt-, Tourismus- und Industrievertreter, Gemeinden, die drei Bundesländer und viele mehr, s. Abb. 9), um eine geeignete Stelle für die Baggergutverbringung im Ästuar oder der Nordsee zu finden. Kernaufgabe war es also, eine stabile Basis für das zukünftige Sedimentmanagement zu finden. Zudem sollten mögliche Strombaumaßnahmen welche den Sedimenttransport positiv beeinflussen könnten sowie deren mögliche Standorte diskutiert werden. Das „Forum“ hatte den Charakter einer Konsultation, da die Entscheidungen letztendlich nur durch die zuständigen Verwaltungsbehörden getroffen werden können. Daher wurde auch fachliches Wissen vermittelt, um bei allen Teilnehmern ein gemeinsames Verständnis der im Elbeästuar stattfindenden Prozesse zu erlangen, und es wurden verschiedene Möglichkeiten für die Verbringung von Baggergut und die Durchführung von Strombaumaßnahmen diskutiert. Am Ende gaben die Mitglieder des „Dialogforums“ die Empfehlung ab, einen Teil des Baggerguts in die Nordsee, in die Nähe der Tonne „E3“ verbringen zu lassen.

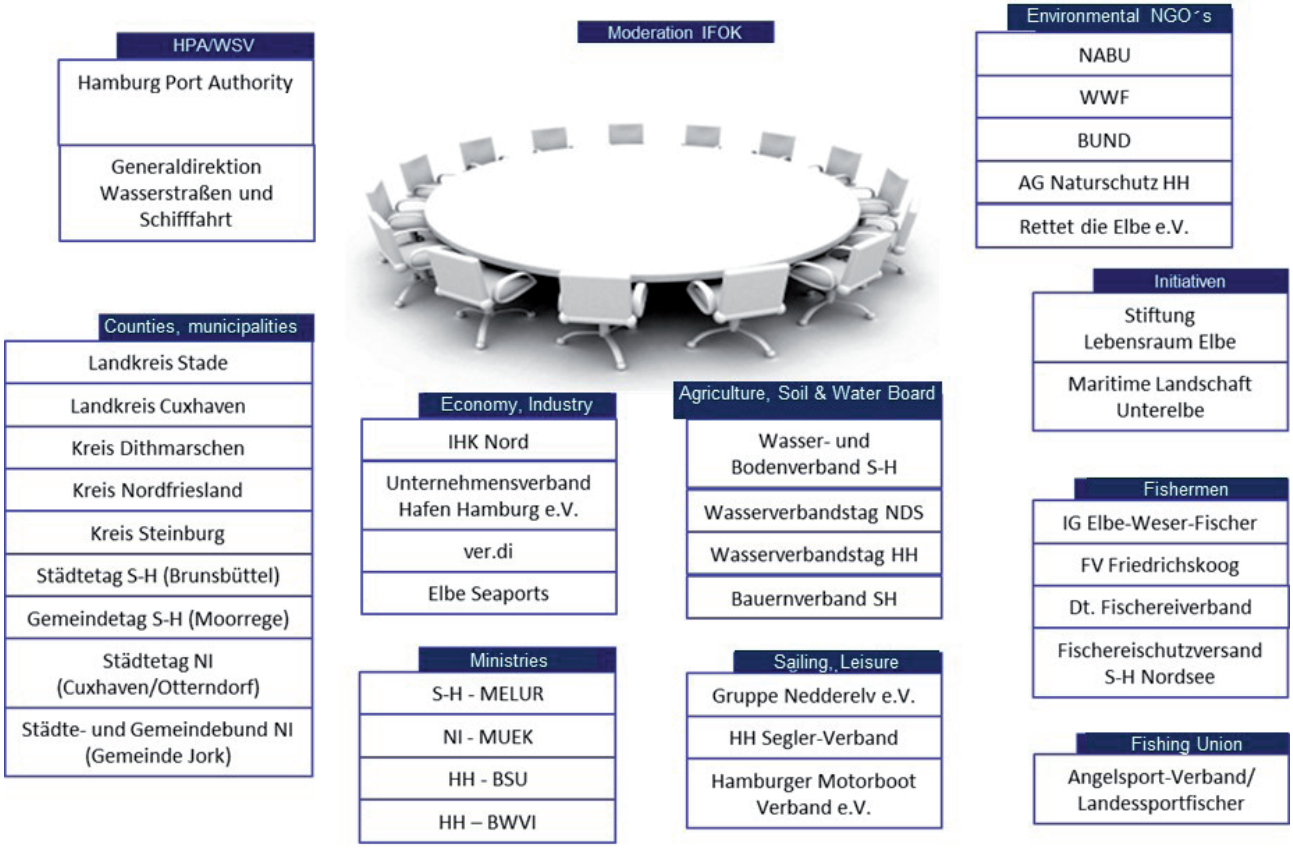


Abbildung 9: Teilnehmer des ´Dialogforums Tideelbe´

5. Erfahrungen

Das Projekt „Kreetsand/Spadenlander Busch“ wird als erfolgreich bezüglich der Schaffung von neuen unter Tideeinfluss stehenden Habitaten angesehen. Außerdem wird der Öffentlichkeit die Möglichkeit geboten, einen ästuarinen Naturraum vor Ort selbst zu erleben.

Der Effekt der Maßnahme auf die Verringerung der Tidenenergie wird aufgrund des Ausmaßes und der Lage des Gebietes im Elbeästuar nur marginal sein. Für eine erfolgreichere Zielerfüllung, das heißt einen größeren Effekt auf die Dämpfung der Tidenenergie, wäre eine andere Position der Maßnahme und wesentlich mehr Fläche notwendig (Saathoff et al. 2013). Aber aufgrund des deutschen föderalen Systems konnte eine derartige Maßnahme bislang nur auf Hamburger Stadtgebiet umgesetzt werden. Und zu der Zeit war keine andere derart geeignete Stelle in dem dicht besiedelten Hamburger Gebiet vorhanden.

Letztendlich wird die Maßnahme jedoch zu einem besseren Verständnis der Reaktion des ästuarinen Systems auf die Durchführung von Strombaumaßnahmen führen und so zur Verbesserung des Selektionsprozesses und Designs weiterer potenzieller Maßnahmen und deren Erfolg beitragen. Das geplante Monitoring und die anschließende Evaluation der Maßnahme wird als Erfolgskontrolle der Arbeiten zeigen, inwieweit sie zur Reduzierung des Sedimenttransportes, Änderung des Tidenhubes, und Zielerreichung der europäischen FFH-Richtlinie (EU 1992) beigetragen hat.

Die Ausführung der Maßnahme “Kreetsand/Spadenlander Busch” ist voraussichtlich ein Anfang von weiteren, größeren Strombaumaßnahmen, die für das Elbeästuar in Erwägung gezogen werden. Im Jahr 2015, am Ende des sehr intensiven Kommunikationsprozesses wurde deutlich, dass mehr Zeit nötig ist, um weitere mögliche Maßnahmen zu untersuchen. Aber auch, dass es aufgrund der komplexen Situation von verschiedensten vorherrschenden Interessen der drei Bundesstaaten und Stakeholdergruppen schwierig sein würde, geeignete Stellen festzulegen.

6. Wie weiter

Als sich herausstellte, dass der Effekt des Pilotprojektes „Kreetsand/Spadenlander Busch” bezüglich des angestrebten Ziels „Regulierung von Wassermengen: Abschwächung von Tidenenergie“ geringer ausfallen wird als ursprünglich erwartet, herrschte breite Übereinstimmung darüber, dass weitere und größere Maßnahmen umgesetzt wer-

den müssen um einen größeren Effekt auf die Reduzierung der Tidenenergie zu erreichen. Daher entschieden die Teilnehmer des „Dialogforums“, dass der erfolgreiche Kommunikationsprozess weitergeführt werden sollte.

Daraufhin wurde im Dezember 2016 die Ästuarpartnerschaft „Forum Tideelbe” gegründet, in der wiederum alle relevanten Stakeholder entlang der Tideelbe vertreten sind. Die vorrangige Aufgabe der Teilnehmer des Forums besteht darin, mögliche Strombaumaßnahmen hinsichtlich ihres Beitrags zur Stabilisation des Sedimenttransportes, Abschwächung der Tidenenergie und Entwicklung von wertvollen natürlichen Habitaten zu bewerten und einzuordnen. Weitere Ziele dieses Gremiums sind:

- eine Plattform für Informations- und Interessensaustausch der Stakeholder zu bieten,
- eine beratende Institution für die verantwortlichen Ministerien der Anrainerbundesländer zu bilden,
- und als vertrauensbildendende Institution für die ganze Region an der Tideelbe zu wirken.

Bereits im vorangegangen Prozess wurde eine Liste mit 23 möglichen Maßnahmen erstellt, die geeignet sind, zur Erreichung der oben beschriebenen Ziele in verschiedenem Maße beizutragen. Dabei werden die Wiederanbindung von Nebenflüssen an die Hauptrinne oder Rückdeichungen als die vielversprechendsten Maßnahmen eingeschätzt. Alle Maßnahmen sind entlang des Ästuars auf den Gebieten der Länder Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Hamburg lokalisiert (Fig. 10).

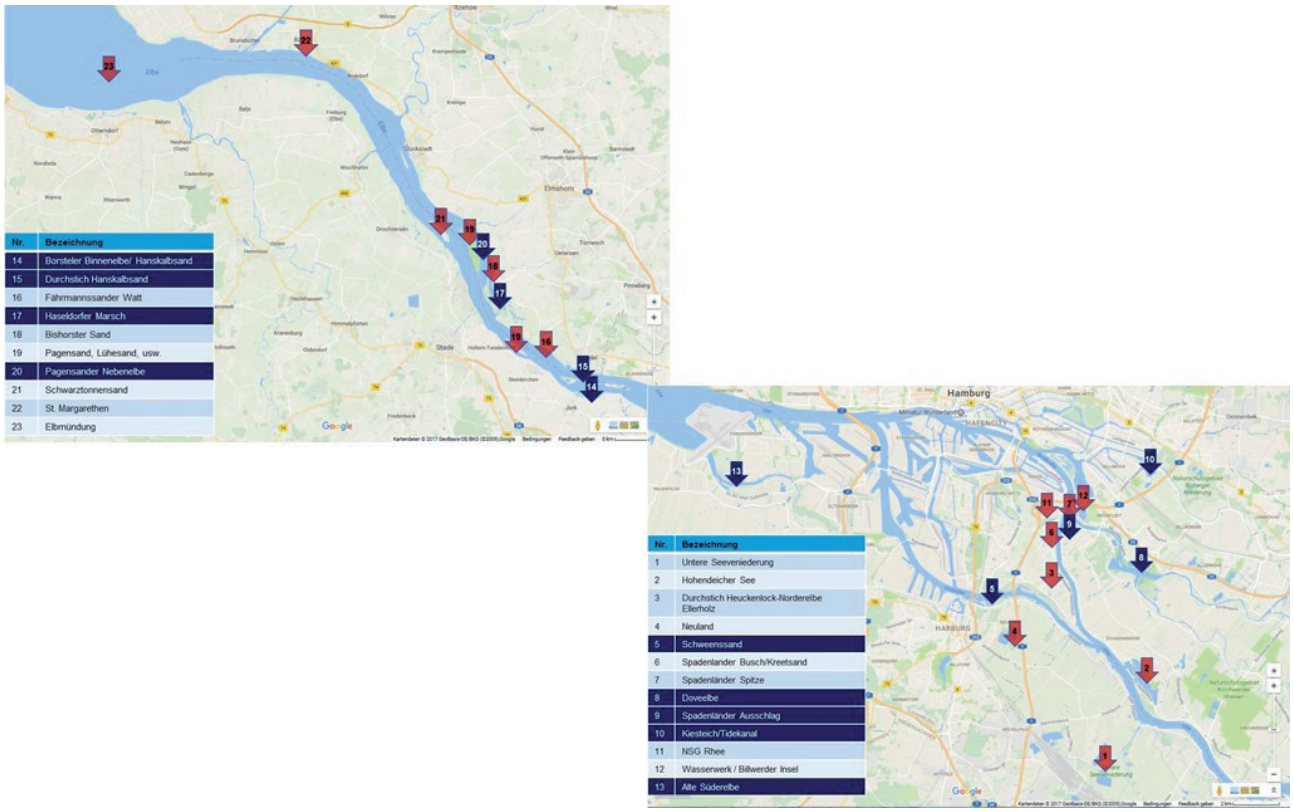


Abbildung 10: Mögliche Orte für die Durchführung von Strombaumaßnahmen im Elbe Ästuar (© Google, Karte verändert).

Innerhalb des Forums richteten die Teilnehmer eine Arbeitsgruppe ein, die bis Ende 2017 auf der Basis von Expertenwissen eine Vorauswahl von Maßnahmen getroffen hat, die in der nächsten Zeit in Form von Machbarkeitsstudien näher betrachtet werden sollen. Die Hauptkriterien für die Auswahl waren:

1. Beitrag der Maßnahme zur Reduktion der Tidenenergie und das Stromauftransportes von Sedimenten,
2. Schaffung von ökologisch wertvollen Habitaten,
3. Machbarkeit (d.h. Betroffenheit des Hochwasserschutzes, verfügbare Flächen, rechtliche Bedenken, …).

Die Arbeitsgruppe hat sechs Maßnahmen ausgewählt, die 2018 und 2019 näher untersucht werden sollen. Dafür sollen technische Machbarkeitsstudien sowie ökologische Untersuchungen ausgeführt werden. Am Ende des Prozesses in 2020 wird das „Forum Tideelbe“ den politisch verantwortlichen Länderministerien einen Abschlussbericht vorlegen, in dem die Empfehlungen des Forums zur weiteren

Umsetzung von Maßnahmen an der Tideelbe ausführlich und transparent begründet werden. Dieser wird die Dokumentation des Auswahlprozesses, die Ergebnisse der Machbarkeitsstudien, Dissens- sowie Konsensentscheidungen der Gruppe bezüglich der ausgewählten Maßnahmen enthalten.

Es wird davon ausgegangen, dass die verantwortlichen Ministerien der Anrainerbundesländer auf Basis dieser Empfehlungen eine Entscheidung zur weiteren Ausführung von Maßnahmen an der Tideelbe treffen. Bis zum jetzigen Zeitpunkt ist ein solcher Prozess, d.h. verschiedene gesellschaftliche Gruppen in Prozesse des Ästuarmanagements einzubeziehen, einmalig in Deutschland.

7. Literatur

European Commission (1992). Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora. http://ec.europa.eu/environment/nature/legislation/habitatsdirective/index_en.htm

European Commission (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy (Water Framework Directive). http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/index_en.html

HPA & WSV (Hamburg Port Authority &, Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes) (2008). River Engineering and Sediment Management Concept for the Tidal Elbe. German version “Strombau- und Sedimentmanagementkonzept für die Tideelbe“. https://www.hamburg-port-authority.de/de/hpa-360/

http://www.tide-toolbox.eu/. (Zugriff am 5. Januar 2018)

http://www.pianc.org. (Zugriff am 5. Januar 201)

https://en.wikipedia.org/wiki/Stuttgart_21. (Zugriff am 5. Januar 2018)

https://ceq.doe.gov/

https://www.helcom.fi

https://www.ospar.org/

MA (2005). Millennium Ecosystem Assessment – Ecosystems and Human Well-being. Synthèses. http://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf.

PIANC (2018). Report No. 176-2018. Guide for Applying Working with Nature to Navigation Infrastructure Projects.

Rönnbäck, P., Kautsky, N., Pih,l L., Troell, M., Söderqvist, T. & Wennhage, H. (2007). Ecosystem Goods and Services from Swedish Coastal Habitats: Identification, Valuation, and Implications of Ecosystem Shifts. Ambio 36 (7): 534-544.

Saathoff, S., Knüppel, J., Manson, S. & Boerema, A. (2013). Management measures analysis and comparison. Investigation of measures planned and implemented at the estuaries of Weser, Elbe, Humber and Scheldt. Study report in the framework of the Interreg IVB project TIDE. http://www.tide-toolbox.eu/pdf/reports/Managment_measure_analysis_comparison.pdf

Scott, C., Armstrong, S., Townsend, I., Dixon, M. & Everard, M. (2011). Lessons learned from 20 years of Managed. Realignment and Regulated Tidal Exchange in the UK. ICE Conference Paper.

US National Environmental Policy Act (1970): https://ceq.doe.gov/laws-regulations/laws.html