

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Periodical Part, Published Version

**Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.)**

**Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2014**

BAWForschungskompodium

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101766>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

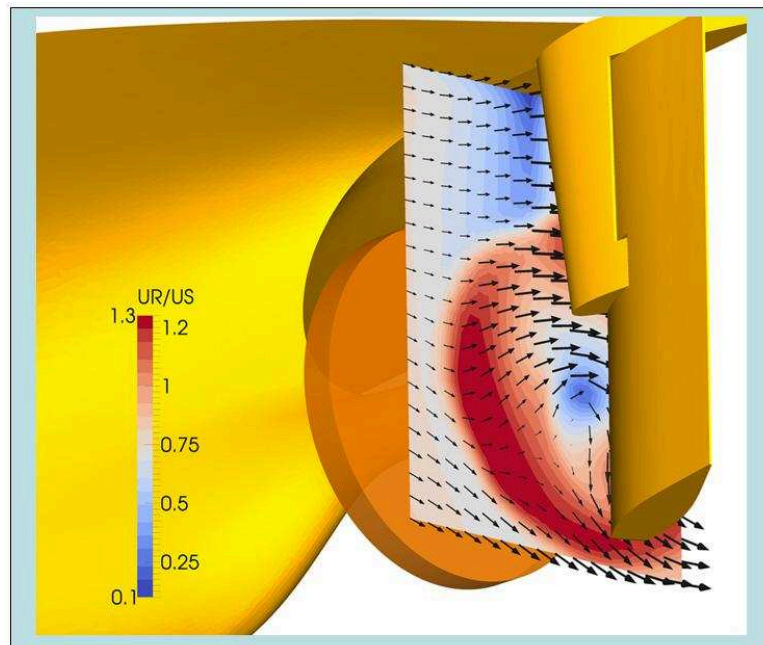
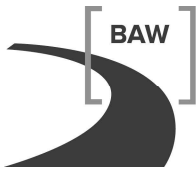
Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2014): Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2014. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAWForschungskompodium).

**Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

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

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

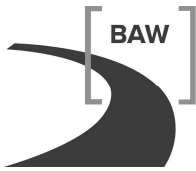




## Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2014

**Titelbild:** *Analyse der Strömungsbedingungen im Bereich der Anströmung des Ruderblatts mittels numerischer Strömungssimulation durch Lösung der RANS-Gleichungen mit OpenFOAM, Vergabe an die TU-Berlin, Fachgebiet Dynamik Maritimer Systeme.  
(FuE-Vorhaben A39550270132)*





## Vorwort

Mit 105 aktiven Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (FuE-Vorhaben) im Jahr 2014 hat die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) als technisch-wissenschaftliche Bundesoberbehörde dazu beigetragen, Wissenslücken im Verkehrswasserbau zu schließen und dabei sichere, praxisnahe, zukunftsweisende und kostengünstige Lösungen zu entwickeln.

Die verkehrswasserbauliche Forschung der BAW wird auf den Gebieten der Bautechnik, der Geotechnik und des Wasserbaus im Binnen- und Küstenbereich wahrgenommen. Alle vier Fachbereiche betreiben in etwa gleich viele FuE-Vorhaben. Die Forschung der BAW gliedert sich in die Forschungsbereiche: Innovative Technologien, Mobilität, Sicherheit und Schutz sowie Nachhaltigkeit und orientiert sich damit an den Zielen des 3. Verkehrsforschungsprogramms der Bundesregierung „Mobilität und Verkehrstechnologien“. Von den Aufwänden für diese Forschungsbereiche an der gesamten Forschungsleistung entfielen in 2014 rund 42 % auf Nachhaltigkeit, 24 % auf Innovative Technologien, 19 % auf Mobilität und 15 % auf Sicherheit und Schutz. Die BAW betreibt angewandte, praxisorientierte Forschung im Sinne einer Ressortforschung als originäre Aufgabe. Die Ressortforschung ist darauf gerichtet, Entscheidungshilfen zur sachgemäßen Erfüllung der verkehrswasserbaulichen Fachaufgaben der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) und des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) zu entwickeln.

Dem Ziel eines engen Bezugs zwischen der Ressortforschung einerseits und der praktischen Anwendung andererseits wird dadurch Genüge getan, dass die wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der BAW sowohl Forschungs- und Entwicklungsvorhaben als auch Projektaufträge (Gutachten und Beratung) für die WSV betreuen und bearbeiten. Diese Verzahnung trägt zur besonderen fachwissenschaftlichen Kompetenz der BAW bei und gewährleistet die schnelle Nutzung neuer Erkenntnisse. Eine seit 2011 eingerichtete Titelgruppe 05 ermöglicht zur Verstärkung der Forschungsleistung die Einstellung von zeitlich befristetem Forschungspersonal in der Größenordnung von rund 40 Personen.

Die BAW bedient sich bei der Bearbeitung der FuE-Vorhaben der neuesten wissenschaftlichen und technischen Methoden. Für Zuarbeiten und Kooperationen mit Hochschulen, Fachinstituten und Ingenieurbüros auf nationaler und internationaler Ebene standen im Jahr 2014 planmäßig rund 2,5 Mio. € zur Verfügung. Seit 2013 sind Bemühungen im Gang, ein weiteres Forschungsstandbein innerhalb eines BMVI-Expertennetzwerks einzurichten und so ähnliche Fragestellungen verkehrsträgerübergreifend lösen zu wollen und zu können. Nach dem schleppenden Start eines Impulsprogramms in 2014 scheint jedoch eine Mittelverstärkung in 2016 in greifbarer Nähe zu sein.

Das vorliegende Forschungskompodium 2014 gibt einen vollständigen Überblick über die abgeschlossenen, laufenden und neu begonnenen Forschungsaktivitäten der BAW, dargestellt in Form von Kurzberichten.

Prof. Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann  
Leiter der BAW

Dipl.-Ing. Claus Kunz  
Forschungsbeauftragter der BAW



## Inhaltsverzeichnis

### I. Abgeschlossene FuE-Vorhaben in 2014

Bezeichnung	Auftragsnummer	Abteilung <sup>1)</sup>	Forschungs- bereich <sup>2)</sup>	Seite
Korrosionsschutz mit Blatt 87 - Untersuchungen zu Zwischenhaftungs- und Farbproblemen	A39510210309	B	I	2
Überarbeitung des Turbulenzprüfverfahrens für Geokunststoffe	A39510370001	B	N	5
Betone für massige Bauteile von Wasserbauwerken	A39510370003	B	I	7
Wechselbelastungen an Kleinverpresspfählen	A39520270001	G	S	9
Bewertung dynamischer Probelastungen von Bohrpfählen	A39520270002	G	S	13
Ausbildung von Dichtungsanschlüssen im Streckenbereich von Wasserstraßen	A39520410217	G	S	16
Numerische Simulation von hydraulisch induziertem Feststofftransport im Übergangsbereich zwischen Boden und Wasser	A39520470006	G	I	19
Konsolidationsverhalten von Baggergut (Schlick)	A39550110100	KG	N	22
Adaptierung und Erweiterung von Casulli- Algorithmen für Parallelrechner mit Hardware-Beschleunigung und zur Anwendung von konservativen Advektionsverfahren	A39530270001	W	I	26
Bemessung und Konstruktion von Schlauchwehren	A39530370001	W	I	28
Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen	A39530410035	W	M	32
Mindestabstände Schiff-Sohle zur Vermeidung von Steinschlägen	A39530410037	W	S	35
Ermittlung notwendiger Fahrrinnenbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt	A39530470001	W	M	37
AufMod - Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht	A39550270116	KW	I	41
KLIWAS – K3	A39550310162	KW	M	45
KLIMZUG-Nord – Strategische Anpassungsansätze zum Klimawandel in der Metropolregion Hamburg	A39550370163	KW	N	47
Marine Dateninfrastruktur Deutschland; Vorhaben: Küsteningenieurwesen und Küstenschutz	A39550670400	KFKI	I	50

**II. Laufende FuE-Vorhaben in 2014**

<b>Bezeichnung</b>	<b>Auftragsnummer</b>	<b>Abteilung<sup>1)</sup></b>	<b>Forschungsbereich<sup>2)</sup></b>	<b>Seite</b>
Sicherheitskonzept für bestehende Wasserbauwerke (SiBeWa)	A39510070001	B	S	56
Entwicklung eines Erhaltungsmanagementsystems für die WSV (EMS-WSV)	A39510070501	B	S	59
Ermittlung Kräfte bei Ankerwurf auf Kreuzungsbauwerke	A39510110178	B	S	63
Ermüdungssicherheit vollverschlossener Seile	A39510170001	B	S	66
Zwangsbeanspruchung bei dicken, gerissenen Stahlbetonquerschnitten	A39510170002	B	N	69
Bemessungskonzept für Wasserbauwerke auf Erdbeben	A39510170003	B	S	71
Entwicklung eines Verkehrslastmodells für typische Brücken der WSV	A39510170004	B	M	75
Entwicklung eines Ingenieurmodells zur Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit schubunbewehrter Stahlbetonquerschnitte bestehender Wasserbauwerke	A39510170005	B	S	78
Korrosionsschutz von Stahl in Beton - Untersuchungen zum Kathodenschutz der Straßenbrücke B500 über den Rhein bei Iffezheim	A39510270002	B	I	81
Korrosionseigenschaften von Spundwandstählen	A39510270003	B	N	84
Materialkombinationen für das System Laufrad/Laufschiene	A39510270004	B	N	87
Einfluss von Korrosion auf die Ermüdungsfestigkeit von Stahlwasserbaukonstruktionen	A39510270005	B	S	89
Frostwiderstand zementgebundener Baustoffe	A39510308099	B	N	92
Instandsetzungssysteme für alte Wasserbauwerke	A39510310127	B	N	96
Injektion Vorsatzschale	A39510310234	B	I	100
Dauerhaftigkeitsbemessung von Wasserbauwerken	A39510310240	B	N	103
Messverfahren Hydratationswärme	A39510370004	B	N	107
Verwendung von Acrylatgelen und gelartigen Produkten für Instandsetzungsmaßnahmen an Massivbauwerken im Verkehrswasserbau	A39510370005	B	I	110
Ertüchtigung der Bewegungsfugen von Massivbauwerken im Verkehrswasserbau	A39510370006	B	N	113

<b>Bezeichnung</b>	<b>Auftragsnummer</b>	<b>Abteilung<sup>1)</sup></b>	<b>Forschungsbereich<sup>2)</sup></b>	<b>Seite</b>
Betone für Verkehrswasserbauwerke mit Hydroabrasionsbeanspruchung	A39510370008	B	N	116
Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen	A39510370009	B	N	119
Textilbewehrte Mörtel für die Instandsetzung von Wasserbauwerken	A39510370010	B	N	122
Energetische Optimierung der WSV-Gebäude	A39510470001	B	N	124
Parameter für Stoffgesetze bei FE-Berechnungen	A39520205613	G	I	127
Bruch- und Verformungsverhalten von rutschgefährdeten Böschungen unter Berücksichtigung des Dreiphasensystems	A39520210001	G	S	129
Böden unter Stoßbelastung	A39520210014	G	S	131
Modellierung der Verformung nichtbindiger Böden unter zyklischer Belastungseinwirkung von Schleusenbauwerken	A39520210045	G	N	135
Modellierung des Tragverhaltens von Verpressankern in Sand	A39520270003	G	S	139
Hydraulischer Grundbruch unter unterströmten Bauwerken mit luftseitigen Auflastfilter	A39520370001	G	S	142
Hydraulische Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser	A39520370002	G	N	146
Kolmation als Schlüsselgröße der Wechselwirkung Oberflächenwasser – Grundwasser	A39520370003	G	N	149
Bestandsaufnahme vorhandener Deckwerke	A39520410006	G	N	153
Bemessung von geotechnischen Filtern unter instationärer Belastung	A39520410076	G	N	156
Technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen – Quantifizierung ihrer Belastbarkeit und Möglichkeiten ihrer Anwendung an Binnenwasserstraßen	A39520410151	G	N	159
Filterstabilität grober Gesteinskörnungen	A39520470001	G	S	163
Technisch-biologische Ufersicherungen – Theorie und Modellversuche zur Belastbarkeit	A39520470002	G	N	166
Erosion von Dichtungstonen und bindigen Böden unter Strömungsbelastung	A39520470003	G	S	170
Entwicklung des Zustands von Deckwerken bei Absenkung des technischen Standards	A39520470004	G	N	173



Bezeichnung	Auftragsnummer	Abteilung <sup>1)</sup>	Forschungsbereich <sup>2)</sup>	Seite
Numerische Simulation von hydraulisch induziertem Sedimenttransport in Erdbauwerken	A39520470005	G	I	176
Statistische Auswertung von Erschütterungsemissionen	A39520570002	G	S	179
Bemessung korrodierter Stahlspundwände im Wasserbau	A39550110158	KG	N	182
Deckwerksanalyse mit der Distinct Element Method (DEM)	A39550170270	KG	I	186
Bestimmung der Widerstandsfähigkeit von Deichen	A39550170318	KG	S	190
Störung des Baugrundes durch Kampfmittelsondierungen	A39550170362	KG	S	194
Bestimmung des Tragverhaltens von offenen Stahlrohrpfählen	A39550170378	KG	I	198
Einfluss der Vorlandvegetation auf den Hochwasserabfluss und die Sohlstabilität in Bundeswasserstraßen	A39530110036	W	N	201
Untersuchung der Prognosefähigkeit von mehrdimensionalen Feststofftransportmodellen an spezifischen Fragestellungen aus dem Flussbau	A39530110064	W	I	204
Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes	A39530170001	W	M	207
Hydraulische Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen	A39530170002	W	N	210
Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte und Transportphänomene in morphodynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen	A39530170003	W	N	214
Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen	A39530170004	W	N	218
Untersuchungen zur Herstellung bzw. Verbesserung der Sedimentdurchgängigkeit an der Staustufe Iffezheim	A39530170005	W	N	222
Hydraulische Wirkung von Stromregulierungsbauwerken	A39530210077	W	N	226
Multigrid- und Subgrid-Ansatz	A39530270002	W	I	229
Entwicklung eines vereinfachten Füllsystems für Sparschleusen	A39530370002	W	M	233
Koordinierte Bewirtschaftung von Staustufenketten – Modellierung und Betrieb	A39530370003	W	M	236
Wartezeiten vor Engstellen	A39530410036	W	M	239

<b>Bezeichnung</b>	<b>Auftragsnummer</b>	<b>Abteilung<sup>1)</sup></b>	<b>Forschungsbereich<sup>2)</sup></b>	<b>Seite</b>
Einwirkung des Propellerstrahls auf die Gewässersohle	A39530410038	W	N	242
Erweiterung des Binnenschiffsführungssimulators um die Berechnung schiffsinduzierter Wellen und Verbesserung des fahrdynamischen Modells	A39530470003	W	M	247
Integration mehrdimensionaler Modelle in die GBBSOft	A39530470004	W	N	251
Untersuchungen zur Sohl- und Uferbeanspruchung aus Schlagflächenantrieben	A39530470005	W	N	254
Numerische Modellierung von Transportkörpern (Dünen) in Binnenwasserstraßen	A39530570001	W	N	258
Evaluierung und Adaptierung der SPH-Methode für wasserbauliche Fragestellungen an Bundeswasserstraßen	A39530570002	W	I	262
Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiff-fahrtsstraße - Schiffsdynamik	A39550210055	KW	M	266
Schiffsführungssimulation der Revierfahrt (SFS-R)	A39550270132	KW	M	269
Numerische Berechnung der Schiffshydrodynamik und Manövrierfähigkeit im Flachwasser (SHD-F)	A39550270133	KW	M	273
Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen	A39550270141	KW	N	276
Schiffserzeugter Sedimenttransport in Seeschiffahrtsstraßen	A39550270142	KW	N	280
Berücksichtigung von beweglichen oder fixen Strukturen (Schiffe) an der freien Wasseroberfläche im hydrodynamisch numerischen Modell UnTRIM	A39550270149	KW	I	283
Feststofftransport in Ästuaren	A39550270150	KW	I	287
Modulares System für Schelfmeere und Küsten (MOSSCO)	A39550270155	KW	I	292
Verbesserung der Validität und der Prognosefähigkeit des morphodynamischen Verfahrens SediMorph – Phase 2	A39550370178	KW	N	295
Interaktion von Größen des Sedimenttransports und der Wasserqualität in dreidimensionalen Ästuarmodellen	A39550370190	KW	I	299
Weiterentwicklung der Methoden zur Analyse von Simulationsergebnissen	A39550370200	KW	I	302

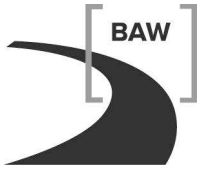
Bezeichnung	Auftragsnummer	Abteilung <sup>1)</sup>	Forschungsbereich <sup>2)</sup>	Seite
Verbesserung von Methoden und Verfahren der BAW zur Entwicklung und belastbaren Beurteilung von Maßnahmen zur Reduzierung des Schwebstofftransportes in die Unterems	A39550370211	KW	N	305
RISC-KIT - Werkzeuge zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit der Küstenregion	A39550370213	KW	I	309
Schaffung von tidebeeinflussten Marschen an der Tideelbe zur Verbesserung des physikalisch-biologischen Systems	A39550370214	KW	N	313
Effizientere Nutzung von Geodaten mit Web Processing Service (RichWPS)	A39550670201	KFKI	I	318

### III. Neue FuE-Vorhaben in 2014

Bezeichnung	Auftragsnummer	Abteilung <sup>1)</sup>	Forschungsbereich <sup>2)</sup>	Seite
Korrosionsschutzuntersuchungen - Vergleich Naturauslagerung zu Labortestverfahren	A39510270006	B	S	324
Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für den Nachweis der Tragfähigkeit von Schlauchwehrmembranen	A39510270007	B	S	327
Instandsetzung von Schleusenanlagen unter Betrieb (IuB)	A39510370011	B	I	330
Entwicklung von Verfahrensweisen zur Simulation bewegter Objekte mit OpenFOAM	A39530370004	W	M	333
Modellierung des human-factor bei der Fahrrinnenbemessung	A39530470006	W	M	336
Historische Systemzustände des Weser-Ästuars (HIWEST)	A39550270168	KW	M	340
Ereignisgesteuerte Morphodynamik im Weserastuar (MorphoWeser)	A39550270223	KW	M	343
Integration D-Flow	A39550370221	KW	I	347
Zukunftskonzept Wasserstraßendatenbank	A39540070004	Z	I	350
Datenmanagement und Qualitätssicherung im Verkehrswasserbau (DMQS)	A39540700005	Z	I	352

1) B: Bautechnik  
 G: Geotechnik  
 W: Wasserbau im Binnenbereich  
 KW: Wasserbau im Küstenbereich  
 KFKI: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen  
 c/o Wasserbau im Küstenbereich  
 Z: Zentraler Service

2) I: Innovative Technologien  
 M: Mobilität  
 S: Sicherheit und Schutz  
 N: Nachhaltigkeit



## **I. Abgeschlossene FuE-Vorhaben in 2014**



## **Korrosionsschutz mit Blatt 87 - Untersuchungen zu Zwischenhaftungs- und Farbproblemen**

**Projekt-Nr.:** A39510210309 (ehemals Nr. 8201)  
**Projektleiter:** Dr. G. Binder, R. Baier, Abteilung Bautechnik,  
Referat Stahlbau, Korrosionsschutz (B2)  
**E-Mail:** guenter.binder@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Im Stahlhochbau werden Korrosionsschutzbeschichtungen überwiegend nach dem Blatt 87 gemäß TL/TP-KOR-Stahlbauten bzw. ZTV-ING eingesetzt. Dabei wird das System werkseitig meist bis zur Zwischenbeschichtung aufgebracht. Durch die üblichen Zwischenstandzeiten von 6 bis 18 Monaten unter den Nutzungsbedingungen des Verkehrs bis zum Aufbringen der farbgebenden Deckbeschichtung (DB aus Polyurethan (PUR)) kann es zu Haftungsproblemen kommen, da die Zwischenbeschichtung aus Epoxidharz (EP) eine gewisse Instabilität (photolytischer Abbau dieser Schicht durch UV-Strahlen und Bewitterung) zeigt. In Folge dessen kommt es zu Haftverbundstörungen zwischen diesen Schichten. Verschiedene Untersuchungen (Gelhaaret al, 2007; Öchsner et al, 2007; Binder, 1996) belegten diesen Befund – sowohl im Labor wie auch auf der Baustelle. Durch die BAW wurden in der Vergangenheit ebenfalls Schadensuntersuchungen an verschiedenen Brücken mit Enthftungerscheinungen durchgeführt, welche allerdings auch auf osmotische Effekte hinweisen; eine eindeutige Unterscheidung der Schadensursache ist daher sehr schwierig.

Ziel der Untersuchungen ist es, Lösungswege zur Vermeidung dieser Haftverbundprobleme herauszuarbeiten. Im Rahmen dieser Untersuchungen werden noch Messungen zur Farbstabilität der farbgebenden Deckbeschichtung, sowohl unter Labor- wie auch unter Praxisbedingungen, durchgeführt, um die Neubauämter bei erhöhten Ansprüchen zur Farbgebung zu unterstützen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) besitzt etwa 1.300 Brücken, die überwiegend mit dem o. g. Schutzsystem verschiedener Hersteller vor Korrosion geschützt sind. Für die Verwaltung gilt grundsätzlich, dass Brückenbeschichtungen ordnungsgemäß übergeben werden und Schwächungen des Haftverbundes, welche gewöhnlich erst später erkennbar werden, zu vermeiden sind.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Es wird anvisiert, unter den gegebenen Umständen – Komplettbeschichtung im Werk nicht möglich – eine gute Qualität des Korrosionsschutzes mit Blatt 87 oder Varianten davon zu erzielen. Hierzu sind Variationen zum bisher üblichen Applikationsablauf, unter Einsatz „neuer“ Stoffe (z. B. Zwischenbeschichtung aus UV-stabilerem aliphatischen 2K-Polyurethan), sowie alternative (Zwischen-)Reinigungsverfahren hinsichtlich ihrer Eignung zu prüfen.

Neben dem Problem der Haltbarkeit des Korrosionsschutzes ist auch die Farbstabilität der Deckbeschichtung an den Bauwerken immer mehr in den Fokus gerückt. Hier ist zu prüfen, inwieweit alternative Stoffe geeigneter sind, dieses Ziel zu erreichen.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Die Untersuchungen stützen sich auf unterschiedliche Vorgehensweisen, d. h. sowohl auf Labor- wie auch Bauwerksuntersuchungen.

In einem Praxisversuch werden seit 2010 an der Haus-Kannener-Brücke, Datteln, Beschichtungssystemvarianten getestet. Die Resultate einer früheren Versuchsserie (Untersuchungen der Deutschen Bahn, BASt und BAW zwischen 1986 und 1996 (Binder, 1996), wurden nochmals kritisch betrachtet und die dazugehörigen Prüfbleche mit verfeinerten Untersuchungsverfahren hinsichtlich des

Haftverbundes nachgemessen. Die Entwicklung der Haftfestigkeit wurde im zeitlichen Verlauf mit den klimatischen Randbedingungen verglichen.

Die jeweiligen Prüfungen werden mit Methoden der Analytik (FTIR-Spektroskopie und colorimetrische Nachweisreaktionen) begleitend untersucht, wobei spezielles Augenmerk auf die prognostizierten (störenden) Abbauprodukte des Epoxidharzes gelegt wird. Hierdurch wäre zum einen ein eindeutiger Nachweis der Schadensursache aber zum anderen auch eine Überprüfung der Zwischenbeschichtung vor Applikation der finalen Deckbeschichtung nach Blatt 87 theoretisch möglich.

### 3 Ergebnisse

Durch einen Hersteller wurden Prüftafeln mit zugelassenen Systemen nach Blatt 87 und Blatt 97 („Blatt 88“ stellt dabei eine noch nicht zugelassene, modifizierte Variante von Blatt 87 dar) unter Aufsicht bis zur Zwischenbeschichtung (ZB) im Technikum hergestellt und danach bewittert. Hierbei konnte schon nach zwei Monaten Freilandbewitterung sowohl bei Blatt 87 als auch Blatt 97 eine deutliche Vergilbung der EP-ZB wahrgenommen werden. Das Beschichten der Deckbeschichtung (DB) erfolgte nach zwei bzw. vier Monaten Zwischenbewitterung (Freilandlagerung in Karlsruhe gemäß DIN 55665). Die Auswertung der Blasenbildung nach dem sogenannten  $\Delta T$ -Test (DIN EN ISO 6270-1) zeigte, dass die Systeme mit Epoxidzwischenbeschichten für Blasenbildung anfällig sind, was den Haftungsproblemen entspricht. Eine Variation der Zwischenreinigung konnte das Problem bei Blatt 87 nicht verhindern. Hingegen waren die Prüfplatten nach „Blatt 88“ frei von jeglichen Anzeichen einer Blasenbildung! Ergänzend konnten in den Waschwässern der bewitterten und vergilbten EP-Zwischenbeschichtungen klassische Abbauprodukte von m-xylyldiamingehärteten Epoxidharzen wie Isophthalsäure und p-Hydroxybenzoesäure isoliert und durch ihr FTIR-Spektrum bzw. Derivatisierung bestimmt werden. Diese Carbonsäuren können nachweislich nur durch den photolytischen Abbau des Epoxidharzes durch die UV-Strahlung des Sonnenlichtes entstanden sein. Colorimetrische Verfahren zum raschen Nachweis dieser Abbauprodukte auf den bewitterten Korrosionsschutzbeschichtung vor Ort haben sich leider als nicht immer sicher erwiesen.

In Bezug auf die Oberflächenvorbereitung der bewitterten EP-Zwischenbeschichtungen sind Hochdruckwasserreinigung oder Reinigung mit einem alkalischen Reiniger (zum Lösen der sauren Abbauprodukte) wenig hilfreich. Eine vollständige Regeneration der Haftfestigkeit bzw. Entfernung der EP-Abbauprodukte kann nur durch kosten- und zeitintensives AnswEEPen sicher realisiert werden.

Dies bedeutet, dass das „Blatt 88“ mit einer Zwischenbeschichtung aus PUR, im Unterschied zu den etablierten Systemen der TL/TP-KOR-Stahlbauten (Blatt 87 und 97), keinerlei Beeinträchtigungen aufweist. Auch die Bestimmung der Haftabzugswerte zeigte einen vergleichbaren Trend.

Der neutrale Salzsprühnebeltest (DIN EN ISO 9227; 2.160 h) zeigte bei allen Serien gute Resultate mit Unterrostungen <1 mm. Dabei ist anzumerken, dass die Systeme mit lediglich drei Schichten bei diesem Zulassungstest geprüft worden sind; üblich sind jedoch in der Praxis vier Schichten, so dass die erwarteten Standzeiten (>15 Jahre; abgeleitet von der Prüfdauer) sicher eingehalten werden sollten.

Im Rahmen des Neubaus der Haus-Kannener-Brücke Nr. 59 wurden größere Versuchstafeln angefertigt und untersucht. Diese wurden entsprechend der Zeitabfolge an den Brückenbauteilen mit wechselnden Schichtaufbauten (Produkte weiterer Hersteller, u. a. mit zugelassenem Blatt 87 - System) versehen und auf Bruchbildungsveränderungen mittels Haftabzug untersucht. Die Resultate zeigen Tendenzen, die man ebenfalls im Labormaßstab gefunden hatte: Schädigung des Haftverbundes nach Zwischenbewitterung bei herkömmlichen Vorgehen nach Blatt 87, nicht jedoch, wenn nach Blatt 87 ausschließlich und komplett im Werk beschichtet wurde bzw. wenn „Blatt 88“ (mit PUR-ZB) eingesetzt worden ist.

Untersuchungen an der Brücke Nr. 474 (Bereich Helmstedt), welche vor sechs Jahren mit dem „Blatt 88“-System beschichtet worden ist, zeigten zufriedenstellende Ergebnisse. Die Haftabzugswerte lagen mit über 7,5 MPa für Baustellenverhältnisse außergewöhnlich hoch. Haftabzugswerte nach Nassspolterbelastung zeigten grundsätzlich keine Haftverbundstörung zwischen der ZB aus PUR und der farbgebenden DB (niedrigere Werte sind auf sog. Kleberisse zurückzuführen). Bestätigend für diese Ergebnisse sind die Untersuchungen an der Neefebrücke/Chemnitz (2.500m<sup>2</sup>) mit ähnlich guten Resultaten nach sechs Jahren Standzeit (Schneider & Gelhaar, ISL; mündl. Mitteilung 2013).

Diese Resultate an Bauwerken spiegeln somit die im Labor- bzw. Technikumsmaßstab erzielten Werte ziemlich genau wider. Als Bilanz kann somit abgeleitet werden, dass Blatt 87 wie auch Blatt 97 nur sicher anzuwenden sind, wenn das System komplett werksseitig beschichtet wird. Die Applikation der DB aus 2K-PUR vor Ort (Baustelle) auf die vorliegende ZB aus EP führt hingegen zur Verbundschwächung. Bei „Blatt 88“, oder auch „modifiziertes Blatt 87“ (neuer BAST-Terminus), sind keine Haftverbundschwächen und keine Einschränkungen hinsichtlich des herkömmlichen Ablaufs der Beschichtungsarbeiten (auf der Baustelle) abzuleiten.

Weitere Projekte, in denen Abweichungen zum herkömmlichen Blatt 87 bzw. 97 empfohlen worden ist, wurden von B2 betreut. Es handelt sich dabei um den Aufbau der Gößerer Landbrücke und des SHW Niederfinow II. Hierzu wurden erste Testmessungen zur Sicherstellung der Qualität des angelieferten (sensiblen) Gelbtönen im Labor von B2 mittels FTIR-Spektroskopie und Headspace-Gaschromatographie an Nassmustern durchgeführt. Hierbei kann festgestellt werden, dass anfälliger organische Gelbpigmente gegen UV-stabile anorganische Verbindungen wie Bismut(III)-vanadat und Bariumsulfat ausgetauscht wurden.

Untersuchungen zum Nachweis der Abbauprodukte des Epoxidharzes bei der Zwischenwitterung zeigten begrenzte Analysemöglichkeiten mit der FT-IR-Spektroskopie auf. Versuche, qualitative Farbreaktionen zum Nachweis der EP-Abbauprodukte anzuwenden, blieben erfolglos.

Die Resultate der Korrosionsschutztests an allen Laborprüfplatten sind abgeschlossen und wurden zusammengestellt. Veröffentlichungen und Vorträge (Baier, R., Binder, G., 2012) zu den Untersuchungsergebnissen haben das Problembewusstsein der Bauherren, Ausführenden, Überwacher und letztlich Stoffhersteller geschärft. Über die BAST-Arbeitsgruppe 2.5 (ZTV-ING) wurde durch die Vorstellung der erzielten Resultate die Möglichkeit des zukünftigen Einsatzes eines „Blatt 88“, integriert in Blatt 87 der TL/TP-KOR-Stahlbauten, eröffnet, bzw. die 2K-PUR-Zwischenbeschichtung (für die Ausführung vor Ort) im Blatt 87 integriert.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

In naher Zukunft werden noch verschiedene Objekte (Haus-Kannener-Brücke Nr. 59, SHW Niederfinow II, etc.) betreut bzw. hinsichtlich der Langzeitwirkung des Korrosionsschutzes nach „Blatt 88“ beobachtet und später ausgewertet.

Die Farbabstandsmessungen bei der BAW werden zwischenzeitlich weitergeführt, wobei ein neues Farbmessgerät zum Einsatz kommt. Hierbei ist zu prüfen, inwieweit Testreihen nach UV- und Xenon-Test sowie Naturauslagerung zu vergleichen sind bzw. voneinander abweichen. Mit der Erstellung des Abschlussberichts im 1. Halbjahr 2014 und mit der Abgabe des Berichts wurde das Projekt abgeschlossen.

Laufzeit des Vorhabens: 2007 bis 2014.

#### **5 Literatur**

- Gelhaar, A., Schneider, A. (2007): Zur Problematik der Zwischenwitterung von Epoxidharz-Teilbeschichtungen an Brückenbauten; Stahlbau, 76 (2007) Heft 2, 131-142  
Öchsner, W. P., Schmidt, R. (2007): Auf der Suche nach optimaler Zwischenhaftung; Farbe und Lack, 113 (2007) Heft 5, 146-155  
Binder, G. (1996): Zwischenreinigung von bewitterten Teilbeschichtungen für den Korrosionsschutz an Brückenbauten; BAW-Brief (1996) Nr. 3, 2-3  
Binder, G. (2007): Korrosionsschutz für den Stahlhochbau; BAW-Brief (2007) Nr. 1, 1-7

#### **6 Veröffentlichungen**

- Binder, G., Baier, R. (2012): Untersuchungen zu Zwischenhaftungsproblemen bei Korrosionsschutzbeschichtungen für den Stahlhochbau; BAW-Brief (2012) Nr. 2  
Baier, R., Binder, G. (2012): Aktuelle Untersuchungsergebnisse zur Zwischenhaftungsproblematik und Folgerungen für Blatt 87 der TL/TP-KOR; Vortag bei BVK-Tagung, Köln, März 2012



## **Überarbeitung des Turbulenzprüfverfahrens für Geokunststoffe**

**Netzplan-Nr.:** A39510370001

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. M. Maisner, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** matthias.maisner@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

Das in der Richtlinie für die Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau (RPG) 1994 beschriebene Turbulenzprüfverfahren ermittelt den Bodendurchgang durch einen geotextilen Filter nach einer mit einem Propeller erzeugten pulsierenden Beanspruchung. Das Prüfverfahren wurde zwischenzeitlich bei CEN und ISO Ebene genormt (DIN EN ISO 10772). Im Rahmen der Normungsarbeit wurden Fragen zur Versuchsmethodik und Prüfeinrichtung aufgeworfen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens in Zusammenarbeit mit anderen europäischen Institutionen wie Rijkswaterstraat (Holland) und Cemagref (Frankreich) mit dem Ziel der Überarbeitung des bisherigen Prüfverfahrens geklärt werden sollen.

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

In den siebziger Jahren wurde in der BAW das heute in der RPG 1994 beschriebene Turbulenzprüfverfahren entwickelt. Versuchsmethodik, Auswertung und Anwendung wurde bisher nicht hinterfragt. Bislang gibt es außer der BAW keine Institutionen, die die Prüfeinrichtung nachgebaut und Tests durchgeführt haben.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Für die WSV ist wünschenswert, dass im Hinblick auf mögliche Streitigkeiten im Zusammenhang mit Neubauvorhaben auch Prüfungen von Dritten zur Beurteilung der genannten Problematik nach einer international eingeführten Norm durchgeführt werden können.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Um eine breite Akzeptanz des bisher ausschließlich in der BAW angewendeten Prüfverfahrens zu erreichen, müssen Fragen zur Versuchsmethodik und Prüfeinrichtung beantwortet werden, die im Rahmen der Normungsarbeit von den Fachkollegen aufgeworfen worden sind. Neben der Überarbeitung des Prüfverfahrens muss auch die derzeitige Prüfeinrichtung hinsichtlich des Zeit- und Präparationsaufwandes optimiert werden. Hierzu ist die Neukonstruktion einer Versuchszelle erforderlich. Ein weiteres Untersuchungsziel ist die Bestimmung der Wiederholpräzision. Des Weiteren muss die Prüfmethodik im Zusammenhang mit den heutigen technischen Möglichkeiten hinterfragt werden. Erörtert werden sollte auch die Übertragbarkeit der zurzeit eingesetzten turbulenten Strömung auf andere turbulente Beanspruchungen wie z. B. Ebbe und Flut.

### **2 Untersuchungsmethoden**

In einem ersten Schritt sollen in Zusammenarbeit mit dem Referat W3 Messungen bezüglich der turbulenten Strömung in der bisherigen Versuchseinrichtung durchgeführt werden. Es soll eine einfache Testzelle konzipiert werden, damit Ringversuche mit anderen Institutionen möglich sind.

### **3 Ergebnisse**

An einem Geotextil, das für Geobags verwendet wird, wurde das Turbulenzprüfverfahren vergleichend mit der Prüfung nach ISO 12956 vor und nach einer Abriebbeanspruchung untersucht. Die Abriebbeanspruchung erfolgte in Anlehnung an das Prüfverfahren der RPG 1994. Es zeigte sich, dass das Turbulenzprüfverfahren im Gegensatz zu der Prüfung mit laminarer Strömung nach ISO 12956 den Einfluss der Abriebbeanspruchung erfasst. Bild 1 zeigt die Bodendurchgangskurven vor und nach der Abriebbeanspruchung. Die Ergebnisse wurden im Tagungsband der Konferenz 9<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics in 2010 vorgestellt. Aufgrund einer neuen Aufgabenpriorisierung (Erhaltung vor Neubau) konnte in der nachfolgenden Zeit keine konzentrierte weitere Bearbeitung des Projektes

erfolgen. Da eine Änderung dieser Situation derzeit nicht absehbar ist, wurde das Projekt in 2014 beendet. Die Fragestellung des Projektes ist weiterhin wichtig für Neubaumaßnahmen der WSV. Sofern zukünftig wieder Personalkapazitäten zur Verfügung stehen, wird ein neues FuE-Projekt eröffnet.

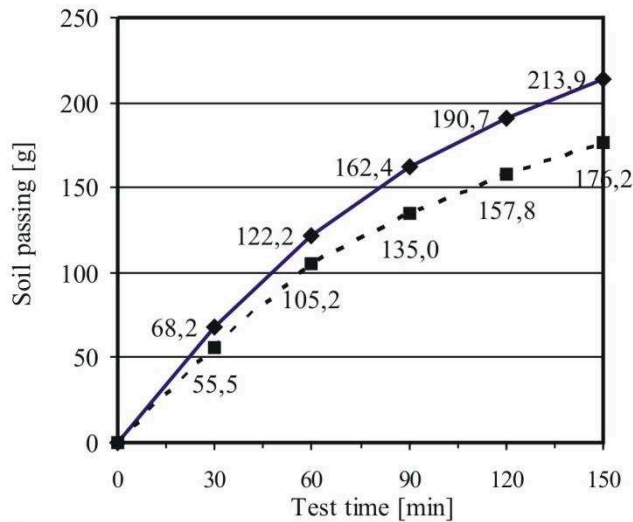


Bild 1: Bodendurchgang (soil passing) vor und nach Abriebbeanspruchung

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2014: Beendigung des Projektes.

Laufzeit des Vorhabens: 2008 bis 2014.

#### 5 Literatur

RPG (1994): Richtlinie für die Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

#### 6 Veröffentlichungen

Maisner, M., Myles, B. (2008): Geotextiles Exposed to Turbulent Water Conditions. In GeoAmericas 2008, the First Pan American Geosynthetics Conference and Exhibition, Cancún, México, from March 2 to 5, 2008.

Maisner, M., Myles, B. (2008): Possible Culpability of Filter Geotextile in the Failure of a Sea Wall. In GeoAmericas 2008, the First Pan American Geosynthetics Conference and Exhibition, Cancún, México, from March 2 to 5, 2008.

Maisner, M., Heibaum, M. (2010): Experimental study on turbulent flow and wet sieving tests after abrasion load of geotextiles 9th International Conference on Geosynthetics, Volume 3, Guaruja, Brasil

## **Betone für massive Bauteile von Wasserbauwerken**

**Projekt-Nr.:** A39510370003

**Projektleiter:** Dr.-Ing. F. Spörel, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** frank.spoerel@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Bei der Konzeption von Betonen für massive Bauteile von Wasserbauwerken sind zwei wesentliche Ziele zu verfolgen:

- Sicherstellung einer hinreichenden Dauerhaftigkeit für eine planmäßige Nutzungsdauer von i.d.R. 100 Jahren
- Reduzierung der Hydratationswärmeentwicklung zur Minimierung von Spannungen aus frühem Zwang

Die Dauerhaftigkeit eines Betons wird in erster Linie durch die Wahl der Betonausgangsstoffe und den Wasser/Bindemittel-Wert bestimmt. Bei den Betonausgangsstoffen enthält die ZTV-W LB 215 ergänzende Regelungen zu DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 wie beispielsweise Einschränkungen bei Zementen und Betonzusatzstoffen. Bei den Anforderungen an die Betonzusammensetzung (Wasser-/Bindemittel-Wert, Zementart, Zementgehalt) werden die Normanforderungen bis auf wenige Ausnahmen übernommen.

Die Dauerhaftigkeit eines Bauteils wird neben der Dauerhaftigkeit des Betons an sich auch durch Anzahl und Breite etwaiger Risse beeinflusst. Risse entstehen bei massigen Bauteilen, wie sie im Wasserbau der Regelfall sind, insbesondere im jungen Alter durch (frühen) Zwang infolge Hydratationswärme. Es müssen deshalb Anstrengungen unternommen werden, derartige Zwangsspannungen von vornherein möglichst gering zu halten. Aus betontechnologischer Sicht sind zur Reduzierung von Zwangsspannungen aus Hydratationswärme vorrangig die Frischbetontemperatur und die adiabatische Temperaturentwicklung des Betons niedrig zu halten. Teil 2 der ZTV-W LB 215 enthält für massive Bauteile entsprechende Anforderungen. Maßgebliche Parameter sind Zementart und Zementgehalt. Die betontechnologischen Anforderungen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit des Betons an sich und der Minimierung der Hydratationswärmeentwicklung u. a. hinsichtlich Bindemittelart und Bindemittelgehalt sind häufig gegenläufig. Das Fenster, welches für die Betonkonzeption zur Verfügung steht, ist bei bestimmten Expositionsklassen vergleichsweise klein. Dies betrifft insbesondere massive Bauteile, die eine intensive Frostbeanspruchung erfahren (XF3, XF4).

Bei der Konzeption von Betonen ist ein Abweichen von den Anforderungen der EN 206-1 / DIN 1045-2 bzw. der Richtlinie „Massige Bauteile aus Beton“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) derzeit im Bereich der Landesbauordnungen nur möglich, wenn Betone mit einer Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) eingesetzt werden, oder wenn eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) durch die Bauaufsicht erteilt wird. Für sog. "Massenbetone" sind bereits mehrere abZ durch das DIBt erteilt worden. Die Zulässigkeit der Normabweichung wird im Rahmen grundsätzlicher Untersuchungen durch den Vergleich mit den Eigenschaften normenkonformer Betone sichergestellt. Die entsprechenden Betone sind für bestimmte Expositionsklassen verwendbar (zumindest [X0, XC1, XA1]; einzelne Zulassungen gehen bis [X0, XC1 bis XC4, XD1 bis XD3, XS1 bis XS3, XF1, XF2, XA1, XA2]). Nach diesen DIBt-Zulassungen dürfen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und hier insbesondere hinsichtlich ihres Bindemittelgehaltes nicht normenkonforme Betone mit bestimmten Bandbreiten bei Ausgangsstoffen und Betonzusammensetzung und Einschränkungen bestimmter Betoneigenschaften im Anwendungsbereich der DIN 1045 verwendet werden. Im Geschäftsbereich des BMVI wären normabweichende Betone ebenfalls über eine ZiE möglich. Über die Verwendung normabweichender Betone mit abZ ist im Angebotsfall grundsätzlich zu entscheiden, insbesondere bei Betonen für den Sohlbereich dürfte dies jedoch unter technischen Aspekten eher unkritisch sein.

## 1.2 Bedeutung für die WSV

Bei Neubaumaßnahmen im Bereich der WSV liegen häufig Randbedingungen vor, bei denen Betone eingesetzt werden, deren Hydratationswärmeentwicklung möglichst gering sein sollte um daraus resultierende Zwangsspannungen niedrig zu halten. Je niedriger die durch Hydratationswärme bedingten Spannungen im Bauteil ausfallen, desto geringer sind die erforderlichen Betonstahlmengen, die zur Rissbegrenzung ausschließlich für diesen anfänglichen Lastfall eingelegt werden müssen. Nachteilig aus Sicht der WSV ist, dass die Verwendung von Betonen mit einer Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung und geringer Hydratationswärmeentwicklung eher zufälligen Charakter besitzt. Aus WSV-Sicht wäre es wünschenswert, Betone mit geringer Hydratationswärmeentwicklung und den entsprechenden Vorteilen bei der Auslegung der Bewehrung auf frühen Zwang standardmäßig einsetzen zu können.

## 1.3 Untersuchungsziel

Im Rahmen dieses FuE-Vorhabens sollte der Frage nachgegangen werden, ob und ggf. inwieweit bei Betonen für massige Bauteile von Wasserbauwerken eine Reduzierung des Zementgehaltes als wesentlichem Parameter für die Hydratationswärmeentwicklung unter die Anforderungen der DIN 1045-2 (2001) bei gleichzeitiger Sicherstellung der erforderlichen Dauerhaftigkeitseigenschaften für eine Nutzungsdauer von 100 Jahren zulässig ist. Die Zulässigkeit der Normabweichungen und deren Grenzen sollten durch geeignete Ansätze (theoretische Überlegungen, Nachweis der Gleichwertigkeit durch Performance-Ansätze) aufgezeigt werden. Für die Umsetzung in die Praxis sollte ein geeignetes Konzept erstellt werden.

## 2 Untersuchungsmethoden

Zum Erreichen der Untersuchungsziele sollte folgende Vorgehensweise verfolgt werden:

- Darstellung des Sachstandes zu Betonen für massige Bauteile mit reduzierter Hydratationswärmeentwicklung unter Berücksichtigung vorhandener Konzepte und vorliegender Erfahrungen, der Sicherstellung der Dauerhaftigkeit, der Anwendungsrandbedingungen und –einschränkungen sowie erforderlicher Qualitätssicherungsmaßnahmen und der Verantwortlichkeiten in Abgrenzung zu normenkonformen Betonen.
- Erstellung und Umsetzung eines Bearbeitungskonzeptes unter Berücksichtigung von ggf. von DIN 1045-2 abweichenden Regelungen für Betonausgangsstoffen und –zusammensetzung, Nachweisformen für die Gleichwertigkeit von Betoneigenschaften, anzustrebenden Größenordnungen der Reduzierung der adiabatischen Temperaturerhöhung sowie baupraktischer und wirtschaftlicher Aspekte.

Das Untersuchungsprogramm sollte durch ein Gremium von anerkannten Betontechnologen begleitet werden um die Vorgehensweise technisch abzusichern und die Akzeptanz in der Praxis zu fördern.

## 3 Ergebnisse

Nach Eröffnung des Projektes konnte aufgrund sich wandelnder Aufgabenpriorisierung (Erhaltung vor Neubau) während der gesamten bisherigen Laufzeit keine konzentrierte Bearbeitung erfolgen. Da eine Änderung dieser Situation derzeit nicht absehbar ist, wurde das Projekt beendet. Eine weitere Bearbeitung der für Neubaumaßnahmen auch weiterhin wichtigen Fragestellung soll erfolgen, sobald entsprechende Personalkapazitäten zur Verfügung stehen. In diesem Fall wird ein neues FuE-Projekt eröffnet.

## 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2014: Beendigung des Projektes

Laufzeit des Vorhabens: 2008 bis 2014.

## 5 Literatur

-/-

## 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Wechselbelastungen an Kleinverpresspfählen**

**Netzplan-Nr.:** A39520270001

**Projektleiterin:** Dipl.-Ing. E. Dornecker, Abteilung Geotechnik, Referat Grundbau (G2)

**E-Mail:** eva.dornecker@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Sowohl Verpressanker wie auch Kleinverpresspfähle werden als Zuelemente zur Verankerung (Rückverankerung von Wänden, Auftriebsverankerung von Sohlen) eingesetzt. Kleinverpresspfähle haben keine freie Stahllänge, sie sind daher aufgrund ihrer Konstruktion nicht vorspannbar. Damit wird eine Schwell- oder Wechsellast nicht über Dehnungen in der freien Stahllänge wie bei Verpressankern "abgefedert", sondern wirkt sich unmittelbar als Belastungsänderung auf den Verpresskörper und die Kontaktfläche Verpresskörper-Boden aus. Bisherige Untersuchungen zeigen, dass dies die Grenztragfähigkeit des Pfahles negativ beeinflussen kann.

Liegt der Anteil der Lastspanne der Schwell- und/oder Wechsellast über 20 % des charakteristischen Herauszieh-Widerstandes (Pfalhtragfähigkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit), kann die Tragfähigkeit deutlich abfallen, siehe EA-Pfähle, 2012. In den EA-Pfähle Abschnitt 13.4 [1] werden Hinweise zur Bemessung von Pfählen unter zyklischer Last gegeben. In Anhang D werden numerische Verfahren zur Bemessung von Pfählen unter zyklischer Last vorgestellt, die jedoch den Stand der Wissenschaft und nicht den Stand der Technik darstellen. Für rollige Böden ist hier ein Interaktionsdiagramm zur Ermittlung der zulässigen Last bzw. der zulässigen Zyklenzahl angegeben, welches jedoch ebenfalls nur informativen Charakter hat. Für die Dimensionierung von Kleinverpresspfählen in bindigen Böden müssen zyklische Probelastungen mit einer großen Anzahl von Lastzyklen durchgeführt werden. In der Regel ist es aus wirtschaftlichen Gründen nicht möglich, die wirklich über die Lebenszeit des Bauwerkes auftretende Anzahl von Lastzyklen in der Probelastung zu simulieren. Es müssen daher aus einer beschränkten Anzahl von Lastzyklen Prognosen für das dauerhafte Verhalten der Pfähle erarbeitet werden.

Aus den bisherigen Untersuchungen gibt es Hinweise darauf, dass unter Wechsellasten ein schlagartiges Versagen mit fast vollständigem Tragfähigkeitsverlust auftreten kann. Dieses Verhalten macht eine zuverlässige Prognose für die Tragfähigkeit eines Pfahles auf Grund einer beschränkten Anzahl von Lastzyklen nahezu unmöglich. Es gibt Hinweise, dass dieses Verhalten auf rollige Böden beschränkt ist. Für bindige Böden lagen jedoch kaum Untersuchungsergebnisse vor.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Langzeit-Tragfähigkeit von Verankerungen mit Kleinverpresspfählen hat für die entsprechend ausgeführten Bauwerke der WSV hohe Sicherheitsrelevanz.

Selbst nach der Durchführung von zyklischen Probelastungen bleiben Unsicherheiten über das dauerhafte Tragverhalten der Kleinverpresspfähle. Aufgrund der vorhandenen Unsicherheiten sollten Bauwerke mit zyklisch belasteten Pfählen dauerhaft bezüglich etwaiger Lageveränderungen beobachtet werden. Durch den in einigen Fällen festgestellten plötzlichen Tragfähigkeitsverlust bleibt auch bei Beobachtung des Bauwerkes eine Unsicherheit hinsichtlich der Beurteilung der Standsicherheit. Ein plötzliches Versagen kann durch die Beobachtung nicht ausgeschlossen werden, weshalb Kleinverpresspfähle mit zyklischen Lasten über 20 % des charakteristischen Herauszieh-Widerstandes in der WSV zurzeit nicht verwendet werden sollen. Damit ergeben sich für die WSV erhebliche Nutzungseinschränkungen. Werden in Ausnahmefällen doch zyklische belastete Mikropfähle verwendet, ist mit erheblichen Kosten zum einen für die Durchführung von zyklischen Probelastungen und zum anderen für die Langzeit-Überwachung zu rechnen.

### 1.3 Untersuchungsziel

Ziel ist es, erste Erfahrungen über das Verhalten von Pfählen unter zyklischen Wechsellasten in bindigen Böden zu sammeln.

### 2 Untersuchungsmethoden

In einem Versuchsfeld, in dem vom Zentrum Geotechnik der TU München im Rahmen eines vom Deutschen Institut für Bautechnik und der Bauwirtschaft geförderten ersten Forschungsvorhabens bereits Versuche mit Schwelllasten an Kleinverpresspfählen durchgeführt wurden, wurden an fünf neu hergestellten Kleinverpresspfählen folgende Versuche durchgeführt:

- 1 statische Pfahlprobelastung auf Zug an einem der Reaktionspfähle
- 1 statische Pfahlprobelastungen auf Druck an einem der Versuchspfähle
- 8 zyklische Pfahlversuche an 4 Versuchspfählen mit Wechsellast

Zusätzlich wurden an einem vorher auf Druck statisch vorbelasteten Pfahl zwei zyklische Pfahlversuche durchgeführt.

Um die Veränderung der Tragfähigkeit von der Schwell- zur Wechselbelastung erfassen zu können, wurden die Probepfähle baugleich zu den Pfählen der ersten Versuchsserie ausgebildet. Mit der Herstellung der Pfähle für dieses Forschungsvorhaben ist das vorhandene Probefeld auf Grund seiner engen räumlichen Ausdehnung erschöpft. Weitere Versuche sind nicht geplant. Die Konzeption, Durchführung und Auswertung der Versuche wurden vom Zentrum Geotechnik der TU München durchgeführt. Die Arbeiten wurden von der BAW begleitet

### 3 Ergebnisse

Zur Ermittlung des charakteristischen Herauszieh-Widerstandes wurden statische Pfahlprobelastungen (maßgebendes Versagenskriterium Kriechmaß von 2 mm) durchgeführt. In Tabelle 1 sind die bei unterschiedlichen Versagenskriterien ermittelten Pfahlwiderstände aus beiden Forschungsvorhaben dargestellt.

Pfahl- widerstand  Versagens- kriterium	R <sub>t,m,i</sub> [kN]		
	Pfahl F / B / E (Zug) (vorhergehendes For- schungsvorhaben)	Pfahl 1 (Zug)	Pfahl 2 (Druck)
Pfahlkopfverschiebung s <sub>g</sub> = 15 mm (entspricht 10 % des Pfahldurchmes- sers)	94,8 / 88,5 / 83,3	89,5	140,0
k <sub>s</sub> ≤ 1,0 mm	80,4 / 77,6 / -	73,5	111,0
k <sub>s</sub> ≤ 2,0 mm	81,5 / 80,4 / -	77,5	125,0

Tabelle 1: Ergebnisse der statischen Pfahlprobelastungen

Aus der statischen Pfahlprobelastung auf Zug ergab sich ein charakteristischer Herauszieh-Widerstand von ca. 77 kN. Die aus der statischen Probelastung auf Druck ermittelte charakteristische Tragfähigkeit von 110 kN lag deutlich höher als die Tragfähigkeit auf Zug. Im Vergleich zu den im Rahmen des ersten Forschungsvorhabens ermittelten Widerständen (80 kN/Zug) wurde zwar ein etwas geringerer Herauszieh-Widerstand ermittelt, die Vergleichbarkeit der Pfähle aus beiden Forschungsvorhaben wurde dennoch als gegeben angenommen.

Die Festlegung der Lastamplitude und des mittleren Lastniveaus erfolgte unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Versuche mit Schwelllasten. Die Wechsellasten sollten, sofern der Pfahl nicht vorher versagt, über 50 000 Lastzyklen aufgebracht werden. Als Versagenskriterien für die Wechsellastversuche wurden eine mittlere absolute Pfahlkopfverschiebung von 15 mm oder eine Verschiebungs-

spanne (Differenz aus maximaler und minimaler Verschiebung innerhalb eines Lastzyklus) von 15 mm festgelegt.

Die Versuchsergebnisse zeigen für Pfähle unter zyklischer Belastung in bindigen Böden folgende Tendenzen im Tragverhalten auf:

- Der Verlust an Tragfähigkeit durch zyklische Belastung ist bei den untersuchten bindigen Böden geringer als bei rolligen Böden.
- Wechsellasten wirken sich ungünstiger auf das Tragverhalten der Pfähle aus als Schwelllasten.
- Bei Wechselbelastung ist neben der Zunahme an Verschiebungen auch mit einem Abfall der Tragfähigkeit der Pfähle zu rechnen.

Ver- suchs- daten  Pfahl	Lastbild				Zyklusanzahl	Zyklusanzahl bis zum Versagen 1. $S_{mittel} = 15 \text{ mm}$ 2. $S_{zykl} = 15 \text{ mm}$
	$F_{mittel}$ [kN]	$F_{max,Zug}$ [kN]	$F_{max,Druck}$ [kN]	$F'_{zykl}$ [kN]	N [-]	
W \ Belastung 1	+5	+20	-10	15	58.030	1.: $> 10^6$ **) 2.: $> 10^7$ ***) Kein Versagenskriterium erreicht, Verschiebungen liegen unter 1 mm
W \ Belastung 2	+5	+40	-30	35	3.177	1.: $\approx 2805$ 2.: 518 Versagen auf Grund zu großer mittlerer Verschiebungen und zu großer Verschiebungsspannen
X	+5	+30	-20	25	39.919	1.: $> 10^6$ *) 2.: $> 7 \cdot 10^6$ ***) Steuerungsfehler bei ca. 40.000 Lastzyklen, Belastung bis ca. 200 kN, daher Auswertung bis $N = 39.919$
V – Belastung 1	+15	+40	-10	25	51.681	1.: $> 7 \cdot 10^5$ *) 2.: $> 2 \cdot 10^6$ ***) Kein Versagen, Pfahlkopfverschiebungen $< 2 \text{ mm}$
V – Belastung 2 (Teil 1 + Teil 2)	+15	+50	-20	35	16.172 (Teil 1) 18.315 (Teil 2)	1.: 19950 2.: $>$ keine Angabe möglich Versuchsabbruch auf Grund eines Steuerungsfehlers (maximale Belastung bei ca. 70 kN), Verschiebungen zu diesem Zeitpunkt bei ca. 13 mm

\*) Zykluszahl aus Verschiebungsverläufen extrapoliert

\*\*) Abschätzung

\*\*\*) Zykluszahl aus Verlauf der Verschiebungsamplitude extrapoliert

Tabelle 2: Übersicht über die Wechsellastversuche, die Anzahl der aufgebrachten Belastungszyklen und die Zykluszahl bei Erreichen des Grenzkriteriums

Durch das Forschungsvorhaben konnten erste Erkenntnisse über das Verhalten von Pfählen unter Wechselbelastung in bindigen Böden gewonnen werden. Die Ergebnisse reichen jedoch nicht aus, um

fundierte allgemeingültige Prognosen über das dauerhafte Tragverhalten zu erlauben. Hierzu sind weitere systematische Untersuchungen erforderlich. Die bei bindigen Böden unter zyklischen Belastungen auftretenden Versagensmechanismen sind bisher weitgehend unerforscht. Auch hier wären weitere Untersuchungen sinnvoll.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Die Arbeiten der TU München wurden 2012 abgeschlossen und in einem Bericht zusammengefasst. 2014 wurde der Abschlussbericht der BAW aufgestellt und das Vorhaben abgeschlossen.

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2014.

#### **5 Literatur**

EA-Pfähle (2012): Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), Ernst & Sohn, 2. Auflage

#### **6 Veröffentlichungen**

Baumbach, J (2012): Untersuchung zum Tragverhalten von axial zyklisch belasteten Mikropfählen im Ton, 32. Baugrundtagung, Forum für junge Geotechnik-Ingenieure, 26.9.2012 Mainz

Baumbach, J (2012): Ergebnisse axial-zyklischer Belastungsversuche unter Schwell- und Wechsellasten an Mikropfählen in Ton, Johann-Ohde-Kolloquium, 7 und 8.03.2012 Karlsruhe

Baumbach, J (2013): Beitrag zum Tragverhalten von Mikropfählen unter axial zyklischer Belastung in bindigen Böden, Schriftenreihe Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik und Tunnelbau der Technischen Universität München, Heft 55



## **Bewertung dynamischer Probelastungen von Bohrpfählen**

**Netzplan-Nr.:** A39520270002

**Projektleiter:** Dr.-Ing. M. Herten, Abteilung Geotechnik, Referat Grundbau (G2)

**E-Mail:** markus.herten@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Eine Tiefgründung wird häufig aus Ramm- oder Bohrpfählen hergestellt. Zur Abschätzung der Tragfähigkeit sind in den EA-Pfähle (2012) Erfahrungswerte aufgeführt. Für den Nachweis der Tragfähigkeit sind jedoch entweder statische oder dynamische Probelastungen erforderlich. Da dynamische Pfahlprobelastungen deutlich kostengünstiger sind als statische, besteht ein großes wirtschaftliches Interesse an deren Verwendung. Vergleichsuntersuchungen zur Tragfähigkeit aus dynamischen und statischen Probelastungen liegen nur in relativ geringer Anzahl vor. Bei gerammten Stahlpfählen zeigt sich häufig eine sehr gute Übereinstimmung wie z. B. bei Bergholz (2012) oder Baeßler et al. (2012) dargestellt. Das Verfahren ist hierfür weitgehend akzeptiert. Bei Bohrpfählen sind jedoch die Anzahl der Vergleichsuntersuchungen und auch die Akzeptanz der dynamischen Prüfung deutlich geringer.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Für die Baumaßnahmen der WSV würde es eine erhebliche Kosteneinsparung bedeuten, wenn statische Probelastungen durch dynamische ersetzt werden könnten.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Es soll eine verlässliche Aussage erreicht werden, inwieweit eindeutige Beziehungen zwischen statischen und dynamischen Probelastungen an Bohrpfählen bestehen und wie gut die Übereinstimmung der Ergebnisse von verschiedenen Instituten ist (Benchmark-Test).

### **2 Untersuchungsmethoden**

Zur Evaluierung von Ergebnissen aus dynamischen Pfahlprobelastungen an Bohrpfählen wurde von BAW und BAM ein Ringversuch durchgeführt, an dem sich fünf Anbieter von dynamischen Prüfungen in Deutschland beteiligt haben. Jedem Prüfer wurde ein anderer Pfahl für die Erstprüfung zur Verfügung gestellt. Der jeweilige Prüfer war für den gesamten Vorgang von der Anbringung der Messtechnik, den gewählten Fallhöhen bis hin zur Modellbildung und Auswertung verantwortlich. Einheitlich war lediglich das Fallgewicht von 11 Tonnen. Nach Durchführung der dynamischen Pfahlprobelastungen an fünf Pfählen und Übergabe einer ersten Auswertung fanden an zwei weiteren Pfählen statische Pfahlprobelastungen statt.

### **3 Ergebnisse**

Die durch die fünf Prüfer ermittelten Tragfähigkeiten streuten sehr stark. Der Vergleich der beiden statischen Pfahlprobelastungen (Bild 2) zeigt jedoch, dass die unterschiedlich ermittelten Tragfähigkeiten anteilig auch der Heterogenität des Baugrunds geschuldet sein können.

Für den Spitzenwiderstand in den mittleren Sanden kann jedoch von außergewöhnlich homogenen Verhältnissen ausgegangen werden, was sich anhand des nahezu identischen Verlaufs der Spitzendruckkraft in der Widerstandsetzungslinie belegen lässt. Bei den beiden statischen Pfahlprobelastungen wurde daher auch nur eine Abweichung des Spitzenwiderstands von ca. 5 % festgestellt. Die Abweichung bei den dynamisch ermittelten Spitzenwiderständen liegt dagegen fast bei 80 % (Bild 1). Ein solcher, durch den vorliegenden Baugrund bedingter Unterschied im Spitzenwiderstand kann jedoch ausgeschlossen werden. Es ist deshalb anzunehmen, dass der Unterschied maßgeblich auf dem indirekten Prüfverfahren und der dabei erforderlichen Interpretation bzw. Auswertung der Messsignale beruht.

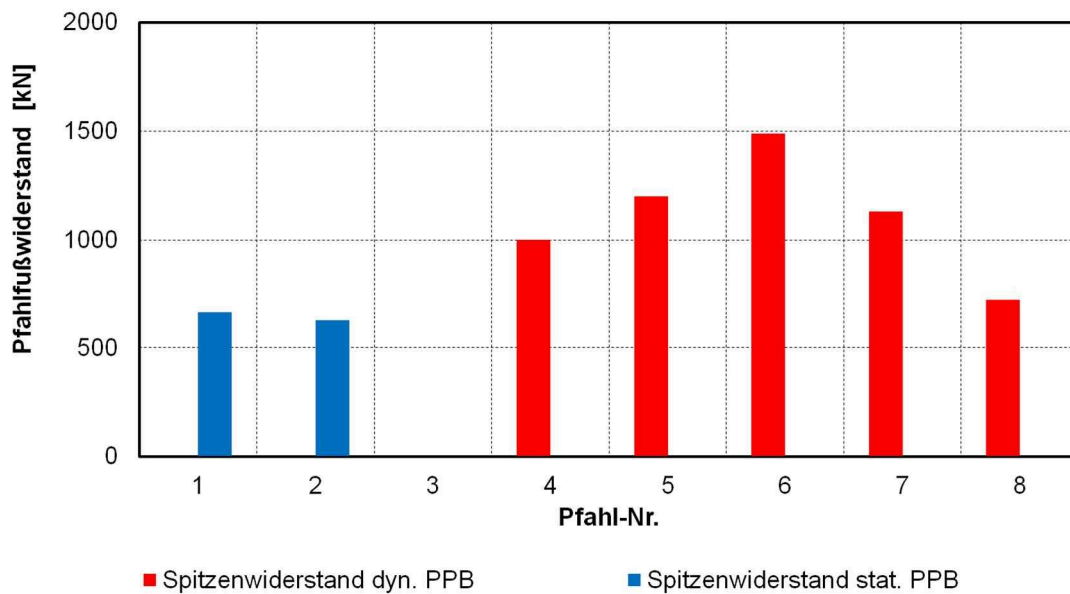


Bild 1: Vergleich Spitzenwiderstand aus statischen und dynamischen Probelastungen

Im Nachgang wurden die vom jeweiligen Prüfer ausgewerteten Messsignale seines Pfahls allen anderen zur Verfügung gestellt. Vier Prüfer analysierten daraufhin auch die Messdaten für die anderen vier Pfähle. Wie aus Bild 2 ersichtlich, ergab sich auch für die Auswertung der selben Messdaten eine starke Streuung bei den ermittelten Tragfähigkeiten.

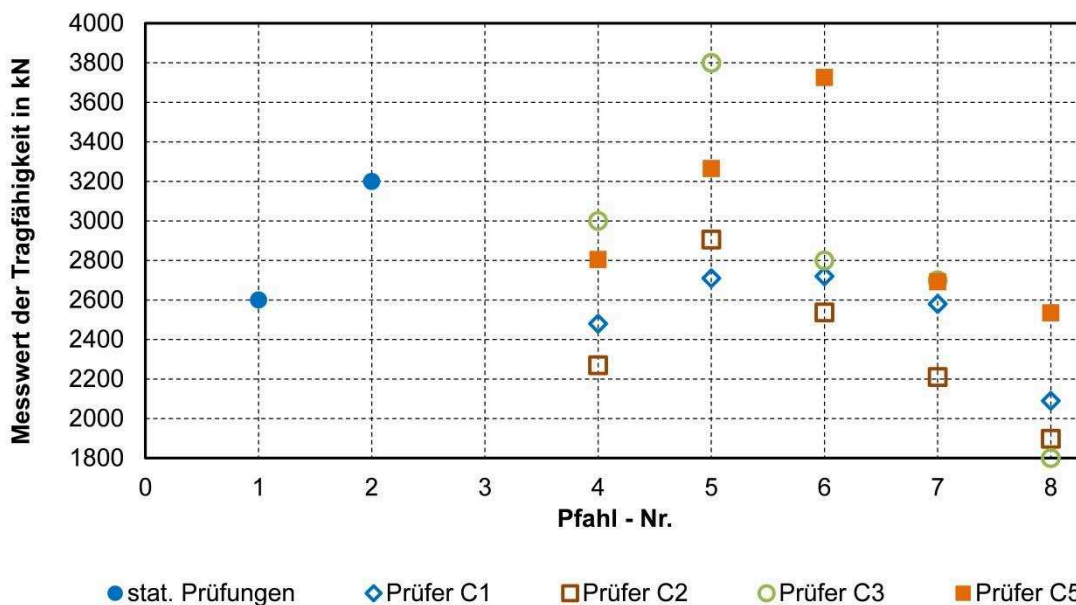


Bild 2: Vergleich der statischen Probelastungen und Auswertung der dynamischen durch vier Prüfer

Die Normen berücksichtigen die Art der Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit bei der Bestimmung der Bemessungswerte. Daher kann eine Bewertung der verschiedenen Prüfmethode bezüglich Wirtschaftlichkeit und Sicherheit nur in deren Kontext erfolgen. Werden nun die aus den Ergebnissen eines jeweiligen Prüfers berechneten Bemessungswerte miteinander verglichen, ergeben sich auch hier sehr große Abweichungen. Der so ermittelte maximale Bemessungswert liegt jedoch in der Größenordnung der Auswertung der beiden statischen Probelastungen. D. h. die Bemessung

auf Grundlage dynamischer Pfahlprobelastungen ergibt in diesem Fall mit den in der Norm festgelegten Streuungsfaktoren und Teilsicherheitsbeiwerten kein Sicherheitsdefizit, ist aber eventuell unwirtschaftlich. Die Bemessung mit Erfahrungswerten der EA-Pfähle würde hier trotz eines größeren Teilsicherheitsbeiwerts auf der unsicheren Seite liegen.

Als Schlussfolgerung verbleibt vorläufig, dass die numerische Modellbildung bei dynamischen Probelastungen, insbesondere bei Bohrpfählen, gegenüber der Auswertung einer statischen Probelastung kein eindeutiges Ergebnis liefert und entsprechend zu bewerten ist. Unabhängig davon hat sich hier jedoch gezeigt, dass eine Überprüfung der mit Erfahrungswerten nach EA-Pfähle ermittelten Grenztragfähigkeiten gegebenenfalls auch mit dynamischen Pfahlprobelastungen angebracht ist.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

In 2014 wurden die Ergebnisse im Rahmen der International Conference on Piling and Deep Foundations vorgestellt (Niederleithinger et al., 2014) und das Forschungsvorhaben beendet.

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2014.

#### 5 Literatur

Bergholz, K. (2012); Vertikale Grenztragfähigkeit von Spundwänden im Lockergestein, 32. Baugrundtagung, Tagungsband Forum für junge Geotechniker, S. 167-174,  
EA-Pfähle (2012): Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), Ernst & Sohn, 2. Auflage

#### 6 Veröffentlichungen

Baeßler, M., Niederleithinger, E., Georgi, S., Herten, M. (2012): „Evaluation of the dynamic load test on bored piles in sandy soil“. In: Matsumoto, T.: IS Kanazawa 2012 - 9th International conference on testing and design methods for deep foundations, S. 155-162  
Niederleithinger, E.; Baeßler, M.; Georgi, S.; Herten, M.; Tronicke, J.; Rumpf, M. (2012): „Geotechnical and geophysical characterisation of a pile test site in post-glacial soil“. In: Coutinho, R., & P. Mayne: Geotechnical and Geophysical Site Characterisation 4, CRC Press  
Herten, M.; Baeßler, M.; Niederleithinger, E.; Georgi, S. (2013): Bewertung dynamischer Pfahlprobelastungen an Bohrpfählen, Tagungsband zum Pfahl-Symposium 2013, 21. - 22. Februar 2013, Institut für Grundbau und Bodenmechanik TU Braunschweig  
Baeßler, M.; Niederleithinger, E.; Herten, M.; Georgi, S. (2013): Dynamische Pfahlprobelastungen an Bohrpfählen in einem Testfeld: Ein Ringversuch, Christian Veder Kolloquium, Graz  
Schilder, C.; Kohlhoff, H.; Hofmann, D.; Basedau, F.; Habel, W. R.; Baeßler, M.; Niederleithinger, E.; Georgi, S.; Herten, M. (2013): Static and dynamic pile testing of reinforced concrete piles with structure integrated fibre optic strain sensors, Proc. of SPIE, 5th European Workshop on Optical Fibre Sensors, Krakow  
Niederleithinger E, Baeßler M, Georgi S, Herten M (2014): Comparison of Static and Dynamic Load Tests on Bored Piles in Glacial Soil, Proceedings of 11th International Conference on Piling and Deep Foundations, Stockholm

## **Ausbildung von Dichtungsanschlüssen im Streckenbereich von Wasserstraßen**

**Netzplan-Nr.:** A39520410217

**Projektleiter:** Dr.-Ing. J. Kayser, Abteilung Geotechnik, Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

**E-Mail:** jan.kayser@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Dichtungen haben im Verkehrswasserbau eine zentrale Bedeutung. Ihre Aufgaben bestehen darin, Sickerwasserverluste aus der Wasserstraße zu verhindern bzw. zu begrenzen und so die Standsicherheit von Wasserbauwerken zu gewährleisten. Zur Anwendung von Oberflächendichtungen an Wasserstraßen gibt es bereits ausführliche Empfehlungen (BAW, 2002). Die Qualität und Wirksamkeit einer hergestellten Dichtung wird auch maßgebend durch die Dichtungsanschlüsse bestimmt. Hierbei sind insbesondere Bau- und Herstellprozesse, durch welche die Dichtungsanschlüsse undicht werden können, von Bedeutung. Bei mangelhafter Anbindung der Dichtung an Bauwerke kommt es zu konzentrierten Durchströmungen des umgebenden Baugrundes bzw. Damms und in deren Folge ggf. zu erheblichen Standsicherheitsproblemen. Schadensfälle aus der vergangenen Zeit haben dies immer wieder sehr eindrucksvoll gezeigt.

Eine Zusammenstellung und Erläuterung von unterschiedlichen konstruktiven Lösungen für planmäßige Dichtungsanschlüsse, aber auch Konzepte für den Havariefall sowie Sanierungsmöglichkeiten sollen für die WSV eine Grundlage für Planung und Ausführung von Baumaßnahmen an der Wasserstraße, aber auch für schnelles Entscheiden und Handeln in einem Havariefall sein.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Der Anschluss einer Kanaldichtung an Bauwerke hat für die WSV erhebliche Sicherheitsrelevanz. Dies wurde u. a. wieder beim Bau der KÜ Elbeu (MLK) deutlich, wo es bei der Flutung eines neuen Kanalabschnitts zu Wasseraustritten im Damm kam. Deren Ursache ist noch nicht genau geklärt, möglich ist jedoch eine Undichtigkeit am Anschluss der Tondichtung an die Spundwand.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Ziel besteht in der Erarbeitung von Empfehlungen zur Ausführung von Dichtungsanschlüssen im Streckenbereich von Wasserstraßen.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Folgende Schritte und Untersuchungsmethoden sind im Einzelnen vorgesehen:

1. Literaturstudie
2. Labor-, Modellversuche (Dichtungsmaterialien, Anschlusskonstruktionen)
3. Entwicklung eines numerischen Modells zur Durchdringung von Bauteilen durch Oberflächendichtungen aus Ton
4. Durchführung von geohydraulischen Berechnungen
5. Zusammenstellung der Ergebnisse

Im Rahmen der Grundsatzaufgabe wurde in einer Vorstudie geprüft, ob der Eindringvorgang eines Bauteils in eine Tondichtung numerisch simuliert werden kann. Das Ergebnis der Vorstudie zeigt, dass dies mit einer gewissen Entwicklungsarbeit grundsätzlich möglich sein sollte.

Für die Modellierung ist ein geeignetes Stoffgesetz zu finden. Hierbei ist das Verhalten des Dichtungstons bei Wechsellast abzubilden, da dieses für eine mögliche Spaltbildung wesentlich ist. Ggf. ist auch ein Spaltwasserdruck zu anzusetzen. Ebenso sind aufgrund der schnellen (dynamischen) Belastung und des hohen Sättigungsgrades Porenwasserdrücke zu berücksichtigen.

Ebenso ist der Eindringvorgang in die Dichtung zu simulieren (z. B. Henke und Grabe, 2009).

Es wurde ein entsprechender Forschungsauftrag an die TU Hamburg-Harburg, Institut für Geotechnik, erteilt. Gegenstand des Forschungsauftrags sind:

1. Erarbeitung einer StoffgesetZRoutine für Ton
2. Bodenmechanische Laborversuche
3. Numerische Untersuchungen
4. Modellversuche

### 3 Ergebnisse

Für die Versuche wurden von der BAW ca. 1.500 kg Ton homogenisiert und eine Festigkeit von ca. 20 kPa aufbereitet. An Teilproben führte die TUHH Laborversuche zur Ermittlung der bodenmechanischen Parameter durch. Im Vordergrund standen hier die Parameter für ein viskohypoplastische Stoffgesetz für den Ton. Entsprechende Parameter für den Sandboden sind bereits bekannt.

In 2013 wurden von der TUHH sowohl numerische Berechnungen als auch Modellversuche durchgeführt. In den numerischen Berechnungen zeigte sich, dass der Eindringvorgang einer Spundwand in den Ton am besten mit dem relativ einfachen Drucker-Prager-Stoffgesetz simuliert werden kann. Dies ist mit den Modellversuchen, die i. W. in 2013 abgeschlossen wurden, zu verifizieren. Ein typisches Bild für die Durchdringung der Tondichtung mit einer Stahlplatte im Modellversuch zeigt Bild 1.



*Bild 1: Modellversuch zur Durchdringung einer Tondichtung mit einer Stahlplatte*

Mit Vorlage des Abschlussberichts durch die TUHH sind die Untersuchungen abgeschlossen. Im Ergebnis und als Konsequenz für Bauausführungen an der Wasserstraße können die Ergebnisse des Forschungsvorhabens wie folgt zusammengefasst werden:

- Eine Tondichtung von 20 cm Dicke und mit einer undrainierten Scherfestigkeit  $c_u \leq 25 \text{ kN/m}^2$  kann zyklische Verformungen bis 5 mm ohne Spaltbildung aufnehmen.
- Bei Verformungen über 5 mm sind mehrere Lastzyklen für die Spaltbildung infolge plastischer Verformungen erforderlich.

- Ein Spalt entwickelt sich mit zunehmenden Lastzyklen, nach 100 bis 140 Lastzyklen vergrößert sich der Spalt nicht mehr.
- Beim Einbringen eines Bauteils durch eine Tondichtung hindurch kommt es zur Verschleppung von Dichtungston in den Untergrund, was die Spaltbildung befördert.

Daher ist für die Praxis zu folgern, dass Bauteile möglichst nicht durch eine Tondichtung hindurchgerammt werden sollen. Wenn dies unbedingt notwendig ist, muss anschließend der Anschluss zwischen Dichtung und Bauteil nachgearbeitet werden. Bei Profilen (z. B. Stahlträger oder Spundwände) muss auch der Bereich innerhalb der Umschließenden nachgearbeitet werden, da hier infolge der vertikalen Tonverschleppung auch Risse auftreten können.

Bei den Modellversuchen und bei den Computersimulationen blieben einige Punkte offen, die im Rahmen eigener Arbeiten am Institut für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg weiter untersucht werden sollen. Dazu gehören

- Zusätzliche Modellversuche zur Untersuchung des Einflusses der Wandrauheit
- Verwendung eines hochwertigen Stoffmodells für die Dichtungsschicht aus Ton, das den Einfluss von Druck, Dichte und Viskosität auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten enthält. Ideal wäre das visko-hypoplastische Modell von Niemunis (2003). Dazu ist eine Erhöhung dessen numerischer Robustheit erforderlich.
- FE-Analysen mit realistischer Simulation der Biegeschwingung der Spundwand. Hierzu ist die Verformbarkeit der Spundwand zu berücksichtigen, wodurch sich bei der verwendeten Analyseprozedur ein großer Rechenaufwand ergibt.
- Numerische Untersuchung zum Einfluss der Adhäsion auf die Spaltbildung. Dazu sind ein entsprechendes Kontaktmodell sowie Scherversuche zwischen Stahl und Ton erforderlich.
- Numerische Untersuchung zum Einfluss der Druckhöhe des Oberflächenwassers auf die Spaltbildung (Spaltwasserdruck).
- Bislang wurde noch nicht untersucht, wie sich ein bereits ausgebildeter Spalt nach der Einbringung des Bauteils verhält. Unter konstanter Spannung zeigen Tone Kriechverformungen, wodurch sich ein Spalt mittel- oder langfristig wieder verschließen kann.

Eine sinnvolle Ergänzung wäre die Berechnung einer Spaltbildung für einen Dichtungskeil mit der CEL-Methode und unter Ansatz der auf der Grundlage der zusätzlichen Untersuchungen entwickelten Stoffmodelle.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

In 2014 wurde von der TUHH der Abschlussbericht zum Untersuchungsauftrag erstellt. Anschließend wurde der Abschlussbericht der BAW verfasst. Das Forschungsvorhaben wird damit beendet.

Laufzeit des Vorhabens: 2006 bis 2014.

#### **5 Literatur**

BAW (2002): Empfehlungen für die Anwendung von Oberflächendichtungen an Sohle und Böschungen an Wasserstraßen (EAO), Mitteilungsblatt Nr. 85, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 2002.

EAAW (2008): Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau (EAAW), Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Essen

Henke, S., Grabe, J. (2009): Zu den Möglichkeiten und Grenzen der numerischen Simulation der Herstellung von Baugruben, Bautechnik, Heft 9, 2009.

Niemunis, A. (2003): Extended hypoplastic models for soils. Schriftreihe des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, Heft 34

#### **6 Veröffentlichungen**

-/-

## **Numerische Simulation von hydraulisch induziertem Feststofftransport im Übergangsbereich zwischen Boden und Wasser**

**Netzplan-Nr.:** A39520470006

**Projektleiter:** V. Kumar, Abteilung Geotechnik, Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

**E-Mail:** vinay.kumar@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Strömungen im Gewässer bewirken Porenwasserströmungen und –drücke auch im angrenzenden Medium (i. W. Boden, aber auch mineralische Schutz- und Filterschichten). Unter bestimmten Bedingungen kann die Wirkung des Wassers am und im Boden sowohl zu Erosionsprozessen als auch zu Änderungen der Spannungszustände und evtl. zum Versagen führen. Hier sind Vorgänge in drei verschiedenen Bereichen besonderes zu betrachten:

1. im freien Gewässer
2. im Boden bzw. in Schutz- und Filterschichten sowie
3. in der Grenzfläche dazwischen.

Zum besseren Verständnis der gekoppelten Vorgänge von Wasserströmung und Feststofftransport können numerische Verfahren beitragen, die auch für große Verformungen geeignet sind. Die derzeit in der Praxis verwendeten numerischen Modelle sind meistens netzbasiert und können bisher keine größeren Verformungen des Bodens, die durch die o. g. Fluid-Boden-Wechselwirkungen induziert werden, abbilden. Um diese Engstelle zu überschreiten sind netzfreie numerische Methoden geeignet, durch die größere Verformungen berücksichtigt werden können.

Eine dieser netzfreien Methoden ist die Methode der Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), die Fragestellungen der Kontinuumsmechanik mit einer endlichen Anzahl von frei beweglichen Partikeln beschreibt. Damit können große Bewegungen realistisch simuliert werden. Um die natürlichen Vorgänge im Modell realitätsnah abbilden zu können, sind eine Verfeinerung der Diskretisierung, also eine Reduzierung der Partikelgröße und/oder eine Erhöhung der Partikelanzahl und eine dementsprechende Rechnerleistung notwendig. Bisher wird SPH häufig in Themenfeldern der Strömungsmechanik und des Küsteningenieurwesens verwendet. Dabei weist SPH gegenüber herkömmlichen numerischen Methoden wie z. B. der Finite-Element- oder Finite-Volumen-Methode insofern Vorteile auf, dass bei der SPH-Methode die Beschreibung größerer Bewegungen der freien Wasseroberfläche vereinfacht ist. Damit kann die Rechnerleistung effizienter eingesetzt werden. In der Festkörpermechanik ist SPH vergleichsweise wenig verwendet, sehr selten wurde das Verfahren bisher in der Geotechnik verwendet. Einige Veröffentlichungen zeigen jedoch, dass die SPH-Methode sowohl für Strömungen in Böden in der Porenskala (Ryan et al., 2010, Sivanesapillai et al., 2013) als auch für Fragestellungen in der Geotechnik (Sakai et al, 2008, Bui et al., 2011, Stefanova et al., 2012, Nonoyama et al, 2013)) verwendet werden kann.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wird SPH für die Fragestellung der Fluid-Boden-Wechselwirkung auf seine Eignung als numerische Methode untersucht, zunächst im Anwendungsbereich der Deckwerksstabilität. Ausgehend von den Grundlagen der SPH-Methode (Gingold & Monaghan 1977, Lucy 1977, Monaghan 1992) wird versucht, einen geeigneten Entwicklungscodem, möglichst Open-Source-Software, z. B. GPUSPH (Héroult et al, 2010), DualSPHysics (Gómez-Gesteira et al, 2012), Gadget-H2O (basiert auf GADGET-2 Springel et al, 2005), aber auch eine kommerzielle Software, z. B. SPARTACUS (EDF R&D, Frankreich) so zu erweitern, dass die für die Beschreibung der Fluid-Boden-Wechselwirkung notwendigen geotechnischen Grundlagen realistisch abgebildet werden können.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die stark gekoppelten Prozesse zwischen Wasser und Boden und deren Wechselwirkungen beeinflussen sowohl die Deckwerksstabilität als auch die Standsicherheit von Bauwerken, die für die Wasserstraßen wichtig sind. Die numerische Berechnung solcher Prozesse kann die Bedingungen und Mechanismen von hydraulisch verursachten Bodentransportvorgängen offenlegen.

### 1.3 Untersuchungsziel

In dieser Arbeit wird die Möglichkeit untersucht, mit der SPH-Methode zunächst Strömungsbedingungen in Gewässern abzubilden und davon ausgehend hydraulisch induzierte größere Bodenverformungen unter Berücksichtigung eines geotechnischen Stoffgesetzes zu beschreiben.

### 2 Untersuchungsmethoden

In verschiedenen SPH-Programmen (zunächst GPUSPH und DualSPPhysics), die als FuE-Codes benutzt werden, wird versucht, die notwendigen Stoffgesetze, Randbedingungen und neuen Funktionalitäten in ein einfaches Anfangs-Randwert-Problem einzubinden. Auf diesem Weg wird die Eignung der verschiedenen Codes bewertet und die Entscheidung zur Auswahl eines Codes getroffen. Darauf basierend wird untersucht, wie die Komplexität der Aufgabenstellung erhöht werden kann, so dass das o. g. Untersuchungsziel erreicht werden kann.

### 3 Ergebnisse

Für die Entwicklung eines SPH-Codes zur Berechnung hydraulisch induzierten Materialtransports am Gewässerbett wurden die ersten Schritte durchgeführt. Diese waren:

- Beschreibung des Bodens als poröses Medium
- Definition des repräsentativen Element(Kontroll-)volumens
- Beschreibung des Bodens über ein elastisches Stoffgesetz
- Beschreibung der Durchströmung des Bodens nach dem Darcy'schen Gesetz
- Berücksichtigung des Einflusses der Strömung auf das mechanische Verhalten des Bodens mit Hilfe der linearen Poroelastizität
- Einrichtung der SPH-Methode als numerisches Verfahren
- Studium vorheriger Untersuchungen mit SPH
- Bewertung der zur Verfügung stehenden SPH-Softwareprodukte und Auswahl eines geeigneten Produkts (DualPhysics)
- Implementierung der o. g. Berechnungsgrundlagen in SPH-Code DualPhysics

In früheren Arbeiten wurden häufig Fragestellungen des Wärmetransports mit SPH behandelt. Diese Arbeiten sind in der Literatur umfänglich dargestellt und boten sich daher als Ausgangspunkt für die Implementierung der Gleichungen in SPH zur Bearbeitung der eigenen Fragestellung an. Dies ist möglich, weil es Parallelen in der mathematischen Beschreibung des mechanischen Verhaltens fester Materialien bei Wärmetransport und dem mechanischen Verhalten von poroelastischen Materialien bei Durchströmung gibt. Daher kann die Implementierung von Wärmetransport in SPH unmittelbar auf Fragestellungen der Durchströmung poroelastischer Medien übertragen werden.

Im Forschungsvorhaben sollte die Grundlage für den kontinuumsbasierten Einsatz von SPH unter Anwendung bekannter Theorien für poröse Medien bzw. elastischer poröser Medien gelegt werden. Darauf aufbauend sind noch weitere Schritte durchzuführen, um vollständig gekoppelte Modelle berechnen zu können. Hierbei hat sich insbesondere der Übergang zwischen dem offenen Gewässer und dem Boden bzw. dem im Boden strömenden Porenwasser als entscheidender Schritt ergeben. Diese Koppelung ist vereinzelt in der Literatur beschrieben. Allerdings zeigte die tiefergehende Diskussion, dass die hierbei zu lösenden Probleme nicht trivial sind und eine Berechnung derzeit allenfalls unter sehr limitierten Randbedingungen möglich ist. Die größte Herausforderung ist hierbei, den aus der Druckverteilung im Wasser resultierenden Massentransport zu ermitteln und diesen dann am Interface zwischen Boden und Gewässer für die SPH-Partikel der flüssigen Phase zu beschreiben.

Auch die Koppelung der Berechnung innerhalb des Bodens, zwischen dem (festen) Korngerüst und dem Grundwasser, ist nicht trivial, besonders für hohe Wasserdrücke, bei denen im Modell große plastische Verformungen auftreten und damit die zunächst vorausgesetzte Thermoelastizität nicht mehr vorhanden ist. Im granularen Medium kann es in diesem Fall zur Verdichtung oder zur Auflockerung kommen.



#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das Forschungsvorhaben wurde beendet, da der Bearbeiter die BAW verlassen hat. Die Verwendung von SPH für Fragestellungen des Bodenmaterialtransports an der Grenze zwischen Gewässer und Boden weist noch zu viele grundlegende Fragestellungen auf, die eine praxisnahe Anwendung von SPH derzeit nicht erkennen lassen. Daher wird das Thema derzeit nicht weiter verfolgt.

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2014.

#### 5 Literatur

- Bui, H.H. Fukagawa, R.(2013):. An improved SPH method for saturated soils and its application to investigate the mechanisms of embankment failure: Case of hydrostatic pore-water pressure. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37(1):31–50, ISSN 03639061. doi: 10.1002/nag.1084.
- Bui H. H., Fukagawa R, Sako K, Wells J C (2011): Slope stability analysis and discontinuous slope failure simulation by elasto-plastic smoothed particle hydrodynamics (SPH). *Géotechnique* 61(7):565-574, 2011
- Gingold R A and Monaghan J J (1977): Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 181 375–89
- Gómez-Gesteira, M., Rogers B., Crespo A J C, Dalrymple R A, Narayanaswamy M., Domínguez J M (2012): SPHysics - development of a free-surface fluid solver- Part 1: Theory and Formulations. *Computers & Geosciences*,48: 289-299. doi:10.1016/j.cageo.2012.02.029
- Hérault A, Bilotta G, Dalrymple R A, (2010): SPH on GPU with CUDA, *Journal of Hydraulic Research*, 48 (Extra Issue), 74-79
- Lucy L B (1977): A numerical approach to the testing of the fission hypothesis *Astron. J.* 82 1013–24, 1977
- Monaghan J J (1992): Smoothed particle hydrodynamics *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 30 543–74
- Nonoyama H, Yashima A, Moriguchi S (2013): Future evolution of slope stability analysis created by SPH method, Posterbeitrag zur 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE), Paris
- Ryan E M, Tartakovsky A M, Amon C H (2010): A novel method for modeling Neumann and Robin boundary conditions in smoothed particle hydrodynamics. *Computer Physics Communications* 181(12): 2008-2023
- Sakai H, Maeda K, Seepage and erosion mechanisms of sandy ground due to air bubbles, Beitrag zur 4th International Conference on Scour and Erosion, Tokyo, 2008
- Sivanesapillai R, Steeb H, Hartmaier A, (2013): Beitrag zur 3rd International Conference on Particle Based Methods. Fundamentals and Applications, Stuttgart
- Stefanova B, Setiz K, Bubel J, Grabe J (2012): Water-Soil interaction simulation using smoothed particle hydrodynamics. ICSE6 Paris
- Springel V (2005): The cosmological simulation code GADGET-2, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 364, 1105–1134

#### 6 Veröffentlichungen

- Kumar, V. (2014): Fluid-Induced Material Transport: A Volume Averaged Approach to Modelling in SPH, Vortrag auf dem SPH-Workshop am 30.6./1.7.2014 in der BAW, Karlsruhe

## **Konsolidationsverhalten von Baggergut (Schlick)**

**Netzplan-Nr.:** A39550110100

**Projektleiter:** Dr.-Ing. M. Pohl, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Geotechnik Nord (K1)

**E-Mail:** martin.pohl@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

Erweiterte Kenntnisse über das Konsolidationsverhalten von Baggergut (Schlick) unter seinem Eigengewicht und nach einer Überdeckung mit Sand sind für die Umsetzung des WSV-Konzepts (Subaquatische Schlickablagerung) unverzichtbar. Zur Erfassung des physikalischen Verhaltens sind Messungen in der Natur erforderlich. Deren Ergebnisse sind mit Hilfe numerischer Verfahren zu simulieren, um durch Anpassungen im numerischen Modell die Bedingungen anderer subaquatischer Ablagerungsstätten berücksichtigen und deren Verhalten prognostizieren zu können.

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Für die Prognostizierung des Verhaltens von Schlickablagerungen sind die sich zeitabhängig entwickelnden Setzungen und Porenwasserdrücke in situ von besonderem Interesse. Abgesehen von durchgeführten Langzeitmessungen der BAW sind die Messdaten von entsprechenden Naturmessungen nicht vollständig zugänglich.

Um das Verhalten des Schlicks im Naturversuch auf andere Schlickablagerungen übertragen und daraus deren Setzungsverhalten prognostizieren zu können, sind numerische Methoden erforderlich. Diesbezügliche numerische Simulationen haben in der Fachwelt aufgrund der fehlenden Datengrundlage (Messwerte), der großen Verformungen im Schlick und dessen rheologischer Eigenschaften nicht stattgefunden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

In der WSV fallen im Rahmen der Unterhaltungsbaggerung der Bundeswasserstraßen große Mengen an Schlick an. Diese werden u. a. subaquatisch abgelagert. Zur Zeit ist es Praxis, die Einspülhöhen und die zeitlichen Wiederaufspülungen an Beobachtungen des eingespülten Materials und am Erfahrungswissen festzumachen. Durch die numerische Simulation des zeitlichen Verhaltens von Schlickablagerungen unter variablen Randbedingungen kann das Verbringungskonzept hinsichtlich der o. g. Punkte optimiert werden. Die zeitlich zunehmenden Standsicherheiten der Schlickablagerungen infolge der Festigkeitszunahme des Schlicks und der Porenwasserabgaben können rechnerisch erfasst und bewertet sowie die Wiederaufspülung exakter terminlich festgesetzt werden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das zeitliche Setzungsverhalten und die sich entwickelnden Porenwasserdrücke in einer Schlickablagerung sollen mit Hilfe eines numerischen Modells unter diversen Randbedingungen prognostizierbar sein.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Der Hamburger Rodewischhafen wurde im Jahr 1993 von der Hamburg Port Authority (HPA) mit Baggergut (Schlick) verfüllt. Von der BAW wurde dort 1994, unmittelbar nach dem Einspülen des Schlicks, eine Messanlage für Setzungs- und Porenwasserdruckmessungen installiert. Für die Messungen wurde ein spezifisches Messgerät entwickelt, das dem Setzungsverhalten des breiig / flüssigen Schlicks folgen kann. Diese Messanlage wurde im Jahr 2000 modernisiert und neu kalibriert. Im Jahr 2004 hatten die oberen Schlickschichten infolge Durchwurzelung und Austrocknung eine ausreichende Festigkeit, um auf dem Baggergut Geotextil- und Sandlagen zur Schaffung einer Containerstellfläche auszubringen. Somit konnten seit Messbeginn Daten von eingespültem Baggergut unter Eigengewicht und zusätzlicher Sand-auflast gewonnen werden.

An frischen Schlickproben aus vergleichbaren Revieren wurden 2008 ergänzende Laborversuche durchgeführt, um die bodenmechanischen Eigenschaften für die numerischen Berechnungen eingrenzen zu können. Für die numerische Simulation wurde wegen der messtechnisch erfassten großen Verformungen und der rheologischen Eigenschaften des Schlicks ein Finite-Differenzen-Programm (FLAC3D) verwendet. Aus zeitlichen Gründen, aufgrund der regulären Projektbearbeitung, wurde im Sept. 2008 das Institut für Geotechnik, Lehrstuhl für Gebirgs- und Felsmechanik/Felsbau der Technischen Universität Bergakademie Freiberg beauftragt, ein Simulationsmodell aufzubauen und die Stoffparameter zu kalibrieren. Im Oktober 2010 wurde deren Endbericht vorgelegt.

### 3 Ergebnisse

Die Messergebnisse aus dem Naturversuch erlauben eine Beurteilung des Konsolidationsverhaltens von Schlick unter Eigengewichtsbedingungen und zusätzlicher Auflastspannung. Die Messdaten von 1994 bis 2010 wurden zusammenfassend ausgewertet.

Die bodenmechanischen Laborversuche wurden numerisch nachgefahren und hierüber die numerischen Stoffparameter ermittelt. Für die Nachrechnung der Laborversuche wurden verschiedene Stoffgesetze angewandt. Hierbei stellte sich das double-yield-model mit einer Volumen- und Scherverfestigung als das geeignete heraus. Berechnungen mit einem linear elastischen Stoffgesetz und dem modifizierten cam-clay-model lieferten keine realistischen Ergebnisse.

Mit den somit ermittelten Stoffparametern wurde der Naturversuch in einem numerischen hydro-mechanisch gekoppelten Simulationsmodell nachgerechnet (Bild1). Die numerische Simulation des Naturversuchs im Rodewischhafen wurde entsprechend den zeitlichen Vorgängen durchgeführt, d. h. Simulation des Schlickeintrags 1993 bis 1994, Austrocknung der obersten Schichten zwischen 1999 und 2004, Einbau von Vertikaldränagen und Ringdränagen sowie lagenweise Sandaufhöhungen bis 2005.

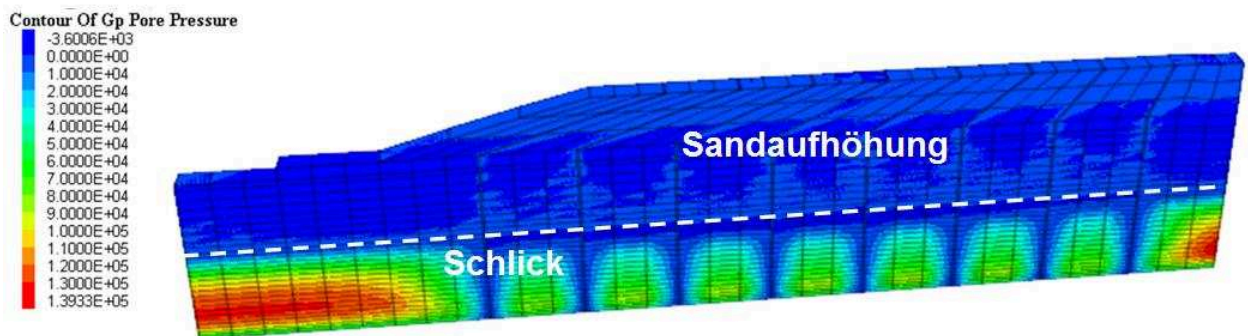


Bild 1: Porenwasserdruckverteilung im numerischen Simulationsmodell mit Vertikaldränagen und Sandaufhöhung

Insbesondere die numerischen Simulationsergebnisse für das zeitabhängige Setzungsverhalten (Bild 2 oben) sind in guter Übereinstimmung mit den physikalischen Messgrößen (Anmerkung: A0, K1-K7 sind Messpunkte über die Schlickschichtmächtigkeit). Die numerisch simulierten Porenwasserdrücke (Bild 2 unten) können ebenfalls als zutreffend bewertet werden, da die maßgeblichen Effekte, wie Sandaufhöhung mit nachfolgender Dissipation, qualitativ mit den physikalischen Messdaten übereinstimmen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass physikalische Effekte, wie Gasentwicklung im Schlick und größere Pflanzen auf der Schlickoberfläche numerisch nur indirekt, z. B. durch die Wahl eines geringeren Kompressionsmoduls für das Wasser und einer trockenen Schlickoberfläche, berücksichtigt worden sind.

Hinsichtlich der Einflussfaktoren Durchlässigkeit des Schlicks, Sättigungsgrad und Wasserstand im Schlick sowie Durchlässigkeit der Sohle wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Hierdurch zeigte sich, dass das Setzungsverhalten im numerischen Modell von den hydraulischen Randbedingungen und der Durchlässigkeit im Schlick dominiert wird.

Im Jahr 2013 wurden Feldflügelsondierungen und Rammkernbohrungen ausgeführt, um die Schlickeigenschaften 20 Jahre nach der Einspülung zu erfassen und im Labor ermitteln zu können. Unter der Containerstellfläche wurden an zwei Lokationen cu-Werte zwischen 30 und 60 sowie zwischen 60 und 80 kPa ermittelt; mit einer leichten Zunahme der Scherfestigkeit zur Tiefe hin. Der Festigkeitsunterschied an den beiden Lokationen ist vermutlich auf eine unterschiedliche Distanz zu eingebauten Dränagen zurückzuführen.

Im Bereich der Messanlage lagen die cu-Werte an beiden Lokationen zwischen 25 und 30 kPa. Eine Tiefenabhängigkeit ist nicht festzustellen.

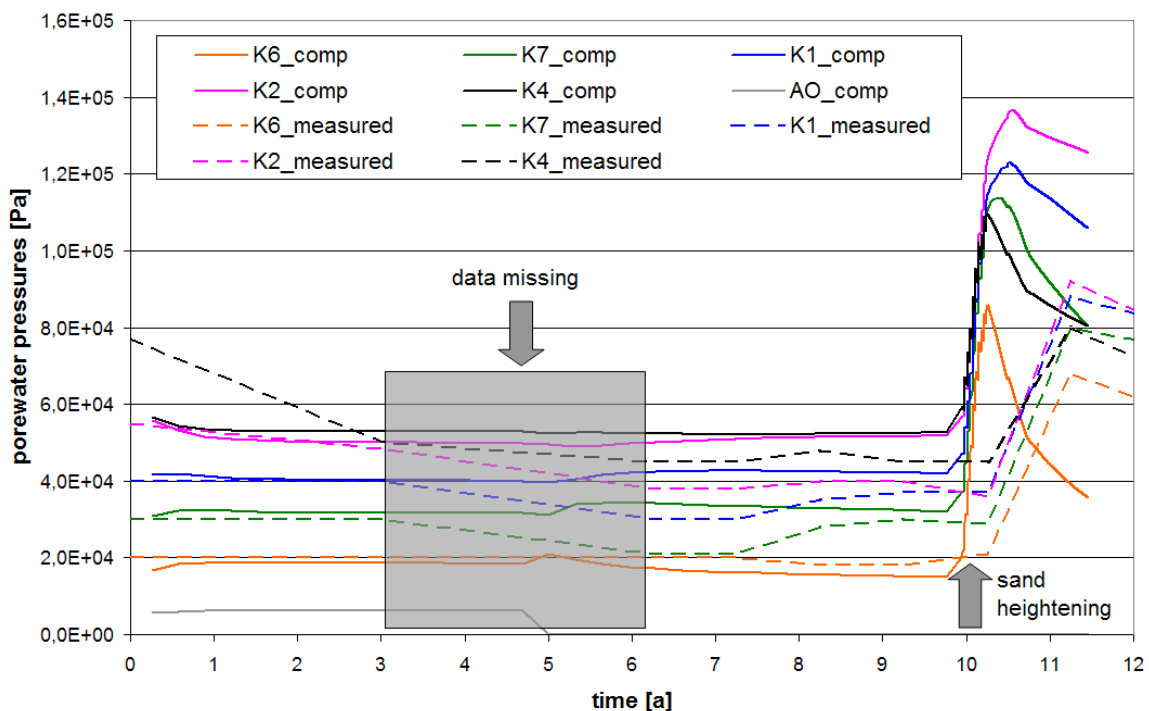
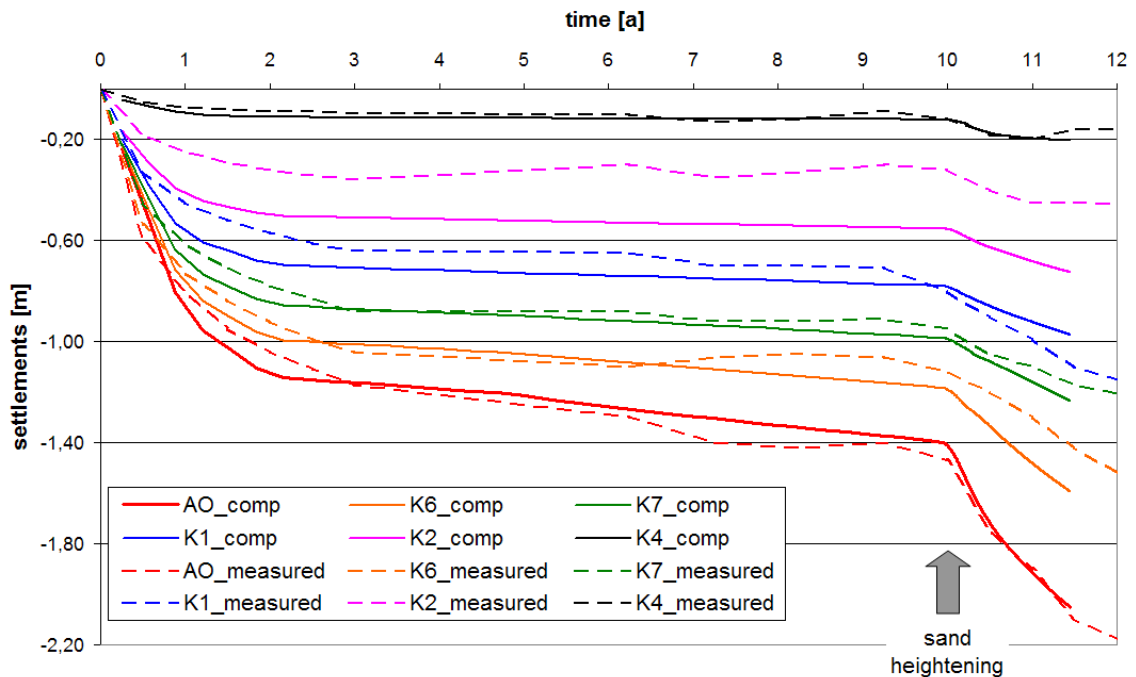


Bild 2: Vergleich der numerisch simulierten (Linien) mit physikalisch gemessenen (Strichlinie) Ergebnissen / oben: Setzungen, unten: Porenwasserdrücke

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Im Jahr 2014 wurde der Abschlussbericht verfasst und das Projekt beendet.

Laufzeit des Vorhabens: 2002 bis 2014.

#### **5 Literatur**

Kiebusch, M. (1998): Wirksame Spannungen in Feinschlammdeponien am Beispiel Rodewischhafen – Hamburg, Braunschweiger Deponieseminar, 1998

#### **6 Veröffentlichungen**

Pohl, M.; Wagner, A.; Herbst, M.; Konietzky, H.(2012): Numerical Simulation of the consolidation behaviour of dredged material based on large scale test, 12th Baltic Sea Geotechnical Conference, Rostock, 2012

Pohl, M. (2011): Konsolidationsverhalten von Baggergut, BAWKolloquium Bauen in Weichböden an Wasserstraßen, 2011

## **Adaptierung und Erweiterung von Casulli-Algorithmen für Parallelrechner mit Hardware-Beschleunigung und zur Anwendung von konservativen Advektionsverfahren**

**Netzplan-Nr.:** A39530270001

**Projektleiter:** Dr.-Ing. J. A. Jankowski, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Numerische Verfahren im Wasserbau (W5)

**E-Mail:** jacek.jankowski@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Der sich in den letzten Jahren abzeichnende Übergang von der homogenen *multicore*- zur heterogenen *manycore*-Rechnerarchitektur wird durch die vereinfachte Nutzung von GPUs zur Hardwarebeschleunigten Ausführung von Codes begleitet. Die dynamischen Entwicklungen im Bereich *General Purpose Computing on Graphics Processing Units* (GPGPU) werden seit 2007 durch die Bereitstellung von Entwicklungswerkzeugen ermöglicht, die eine direkte Verwendung einer GPU für arithmetisch intensive, hoch parallelisierte Operationen erlauben. Während die Nutzung der heterogenen Parallelität für die allgemeine Benutzersoftware die Bewältigung eines schwierigen Paradigmenwechsels sein kann, sind viele Codes aus dem Bereich der physikalischen Simulation bereits vor Jahrzehnten so strukturiert worden, dass die vorhandene feinkörnige Parallelität mit Vektorprozessoren stark beschleunigend wirkte und eine grobkörnige Parallelisierung (über mehrere Rechereinheiten) einfach zu realisieren war. Eines der Verfahren, das vor über einem Jahrzehnt an die Architektur eines parallelen Vektorrechners bestens angepasst und weiterentwickelt wurde, ist das FD/FV-Verfahren mit versetzten, strukturierten Netzen TRIM (Casulli, Cheng, 1992). Obwohl dieser Code durch die Neuentwicklungen für unstrukturierte Netze (UnTRIM (Casulli, Zanolli, 2002)) bereits vor einer Dekade ersetzt wurde, sind die Eigenschaften von Casulli-Algorithmen für Vierecksnetze besonders günstig für eine GPU-Implementierung.

Neben dem Potential für die erfolgreiche Nutzung der heterogenen *manycore*-Rechnerarchitektur spricht für ein Verfahren mit strukturierten Netzen auch die breite Verfügbarkeit von hochaufgelösten topographischen Daten in Rasterform und die Weiterentwicklung von vielen neuen numerischen Schemata für diese Art von Netzen. Von besonderem Interesse sind insbesondere die neuen konservativen Advektionsverfahren. Die bisher verwendeten Advektionsverfahren zu langfristigen Simulationen gewährleisten lediglich Massen- und Energieerhaltung. Dadurch wird zwar eine korrekte Reproduktion des Übergangs zwischen strömender und schießender Strömung erreicht, aber nicht umgekehrt. Es existieren pragmatische Ansätze zur Lösung dieses Problems in versetzten Netzen, die sich abhängig von der Veränderung der Froude-Zahl entlang einer Stromlinie auf die Energie- oder Impulserhaltung umstellen (z. B. Kramer, Stelling, 2009). Erfahrungen sowohl zu der GPU-Implementierung als auch zu konservativen Advektionsverfahren, die in diesem Projekt gesammelt werden, sollen auch auf andere Verfahren, wie z. B. UnTRIM, übertragbar sein.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

- Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Hochleistungsrechnens durch Verwendung von energieeffizienter Hardware (im Sinne der Anzahl der Rechenoperationen pro Watt verbrauchter Energie) durch die gezielte Anpassung der Software.
- Erhöhung der Prognosefähigkeit durch Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten der validierten BAW-Verfahren zur korrekten Erfassung der Übergänge im Strömungscharakter.
- Erzielen einer besseren Beurteilung der Hochwasserneutralität von Baumaßnahmen bei allen Wasserständen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

- Erarbeitung und Anwendung neuer Programmierparadigmen im Hochleistungsrechnen durch die Adaptierung von Casulli-Algorithmen für die neue Rechnerarchitekturen der Parallelrechner mit Hardware-Beschleunigung (Cluster bestehend aus Knoten mit Multi-Kern-CPU's und GPU's).
- Exemplarisch soll dies für das TRIM-Verfahren (Casulli, Cheng, 1992) erfolgen, bei dem die Erfolgsaussichten für eine erfolgreiche Implementierung als sehr hoch angesehen werden. Erfah-

rungen sollen auch auf andere Verfahren, z. B. UnTRIM (Casulli, Zanolli, 2002) direkt übertragbar sein.

- Entwicklung neuer Advektionsverfahren zur Erfassung der lokal und räumlich begrenzt auftretenden Übergänge in der Abflussart (über-/unterkritisch), die bisher teilweise außerhalb des Anwendbarkeitsbereiches der o. g. Verfahren liegen (Stelling, Duinmeijer, 2003, Kramer, Stelling, 2009).

## 2 Untersuchungsmethoden

- Abhängig von den Resultaten der Ersatzbeschaffung des Compute-Servers der Abteilung W, entweder Arbeit auf dem neuen Großrechner oder auf einem getrennten Rechenknoten Multikern-CPU+GPU, der als ein leistungsfähiger PC realisierbar ist.
- Programmierarbeiten mit Nutzung von Entwicklerwerkzeugen für gegebene Hardware.
- Numerische Methoden für Advektionsverfahren.
- Kontakte mit führenden Instituten; Konferenzen; Veröffentlichungen.

## 3 Ergebnisse

In der ersten Phase des Projekts zeigte sich bereits, dass das Erreichen von höheren Beschleunigungsraten für die gegebenen Programme auf heutiger Hardware und mit aktuellen Entwicklungswerkzeugen nur durch erhöhte Programmieraufwände zu erreichen ist. In der zweiten Phase des Projekts wurde daher ein für TRIM bzw. UnTRIM grundlegender Algorithmus für die GPU-Ausführung portiert. Dazu wurde eine von Grund auf neue Portierung für GPU eines vertikal gemittelten (2DV) Finite-Differenzen-Verfahrens (TRIM-2D-Grundlage) mit der Einführung der nicht-linearen Betrachtung vom Trockenfallen/Überfluten programmiert. Dies erfolgte unter Verwendung der Programmiersprache CUDA C/C++ und den insb. für Speicherverwaltung, Datentransfer, Vektoroperationen und iterative Gleichungslöser für lineare Gleichungssysteme spezialisierten THRUST- und CUSP-Bibliotheken. Hiermit wurde eine komplette Adaptierung der gesamten Zeitschleife des gegebenen Verfahrens für eine GPU erreicht, die gleichzeitig Vergleiche der rechnerischen Performance auf einer GPU mit der seriellen Ausführung auf einem CPU-Kern ermöglicht. Das Verfahren erlaubt bei der verwendeten PC-Ausstattung Modellgrößen von 4,5 bzw. 9,5 Millionen Zellen bei doppelter bzw. einfacher Genauigkeit von Gleitkommazahlen. Bei vier unterschiedlichen Testfällen (ohne Ausgabe der Ergebnisse) wurden Beschleunigungen in der Größenordnung von 30 bzw. 20 für einfache bzw. doppelte Genauigkeit erreicht. Das 2DV Verfahren wurde an verschiedenen synthetischen Beispielen und einem existierenden BAW-Modell getestet. Darüber hinaus wurde ein Lagrange-Advektionsschema und konservatives Upwind-Advektionsverfahren nach (Stelling, Duinmeijer, 2003) für GPUs implementiert.

## 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Der Abschlussbericht wurde 2014 fertiggestellt; Empfehlungen für mögliche weitere Vorhaben bezüglich der Verwendung von Hardware-Beschleuniger werden gegeben.

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2014.

## 5 Literatur

- Casulli V, Cheng R. (1992): Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 15, 629–648.
- Casulli V, Zanolli P. (2002): Semi-implicit numerical modelling of non-hydrostatic free-surface flows for environmental problems. *Mathematical and Computer Modelling*, 36, 1131–1149.
- Stelling GS, Duijmeijer SPA (2003): A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 43, 1329-1354.
- Kramer SC, Stelling GS. (2009): A conservative unstructured scheme for rapidly varied flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 58, 183-212.
- Jankowski, J.A. (2012): A hardware-accelerated parallel implementation of a two-dimensional scheme for free surface flows. *Proceedings of 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Hydroinformatics, Hamburg, Germany.*

## 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Bemessung und Konstruktion von Schlauchwehren**

**Netzplan-Nr.:** A39530370001

**Projektleiter:** Dr.-Ing. M. Gebhardt, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Wasserbauwerke (W3)

**E-Mail:** michael.gebhardt@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Schlauchwehrtechnologie ist für die WSV verhältnismäßig neu und wird seit 2001 durch interdisziplinäre FuE-Vorhaben in der BAW begleitet. Mit dem Erscheinen des Mitteilungsblattes Nr. 91, Dezember 2007, wurde das gleichlautende FuE-Vorhaben „Untersuchungen zum Einsatz von Schlauchwehren an Bundeswasserstraßen“ abgeschlossen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Wurden in der Vergangenheit ausschließlich Wehrverschlüsse aus Stahl eingesetzt, hat sich in den vergangenen Jahren das Schlauchwehr als neuer Verschlussstyp in der WSV etabliert. Mittlerweile sind fünf Schlauchwehranlagen an Aller, Unterer-Havel-Wasserstraße und Müritzhavel-Wasserstraße in Betrieb.

Die bisherigen Erfahrungen sind sehr positiv. Zurzeit werden an Neckar und Main Schlauchwehre mit Verschlusshöhen zwischen 4,50 m und 5,00 m geplant. Ferner zeichnet sich in der Expertengruppe „Wehre und Sperrtore“ der Standardisierungskommission ab, dass dieser Verschlussstyp als ein Standard für künftige Planungen festgelegt werden wird.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Untersuchungsziele sind das Füll- und Entleersystem (F1), die Automatische Abfluss- und Stauzielregelung von Schlauchwehren (ASR) (F2), Optimierung von Maßnahmen gegen Schwingungen (F3), Finite-Elemente-(FE) Berechnungen (F4), Relaxation und Retardation der Schlauchmembran in der Klemmkonstruktion (F5), Werkstoffuntersuchungen (F6), Materialwahl für die Verankerungsschienen (F7) und die Erstellung von Bemessungsbeispielen (F8). Aus aktuellem Anlass wurde der Fischabstieg über Schlauchwehre (F9) ergänzt. Ziel war es, die Schädigungsgefahr für Fische besser einschätzen zu können.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Je nach Fragestellung und Untersuchungsziel wurden mehrdimensionale numerische und hydraulische Modelluntersuchungen zur Strömungsmechanik, nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen zur Strukturmechanik sowie Untersuchungen an Normprobekörpern, dynamische Prüfungen und Besusstests durchgeführt.

### **3 Ergebnisse**

Im Rahmen der Masterarbeit von Rudolph (2013) wurden numerische und hydraulische Modelluntersuchungen durchgeführt, um die Überströmung von Schlauchwehren qualitativ und quantitativ zu charakterisieren. Die Untersuchungen zeigen, dass bei einem Schlauchwehr mit Standard-Ablagetisch die Abflusszustände mit einer Schlauchhöhe unter  $h_d/h_1 = 0,54$  unbeeinflusst von der Wehrschwelle sind und daher als unkritisch für den Fischabstieg angesehen werden (Bild 1c). Der Überfallstrahl fällt direkt ins Unterwasser und ein Kontakt des abwandernden Fisches mit der Wehrschwelle ist nicht zu erwarten. Für Schlauchhöhen größer als  $h_d/h_1 = 0,64$  trifft der Überfallstrahl hingegen auf den Ablagetisch und durchschlägt das geringe Wasserpolster (Bild 1a). In diesem kritischen Bereich sind äußere und innere Verletzungen bei Fischen nicht auszuschließen. Zu diesem kritischen Bereich ist allerdings anzumerken, dass gegenwärtig unklar ist, ab welcher Überströmungshöhe die Abwanderungsmöglichkeit von Fischen wahrgenommen wird und diese dann tatsächlich über den Verschluss absteigen.



Je nach Fischart kann dadurch der kritische Abflussbereich mit einem erhöhten Verletzungsrisiko kleiner werden. In einem Übergangsbereich wird der Strahl zwar noch vom Schwellenende beeinflusst, fällt aber in großen Teilen bereits ins Unterwasser (Bild 1b). Hier ist in Relation zum kritischen Bereich von einem geringen Verletzungsrisiko auszugehen. Weitere Untersuchungen an modifizierten Wehrschwelen führten zu einem Ausführungsvorschlag, mit dem der für den Fisch kritische Bereich beim Abstieg minimiert wird. Durch eine verkürzte Wehrschwelle kann der kritische Bereich von  $h_d/h_1 \geq 0,64$  auf  $h_d/h_1 \geq 0,70$  verkleinert werden, das heißt der Überfallstrahl fällt bereits bei kleineren Abflüssen ins Unterwasser (Gebhardt et al., 2013 und Gebhardt et al., 2014).

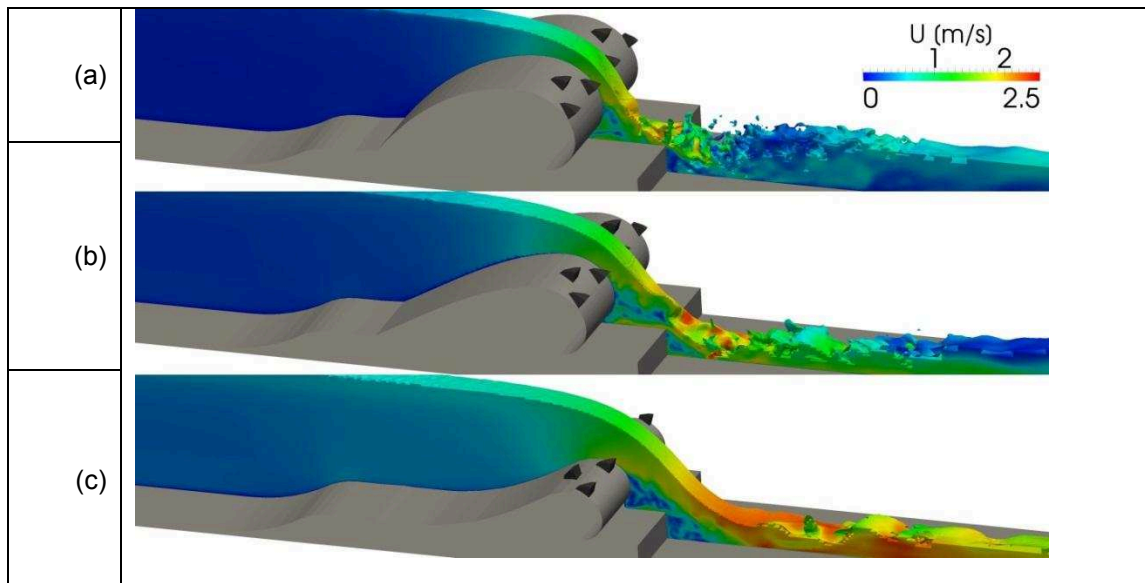


Bild 1: Simulationsergebnis für drei Schlauchgeometrien: (a)  $h_d/h_1 = 0,70$ , (b)  $h_d/h_1 = 0,59$  und (c)  $h_d/h_1 = 0,42$  (Gebhardt et al., 2013)

Im Rahmen der Diplomarbeit von Gurt (2013) wurde ein FE-Modell entwickelt, welches es erlaubt, Vorspannungen in der Schlauchmembran, die durch den Einbauvorgang eingetragen werden, bei der Initialisierung zu berücksichtigen. Hierzu wurden zwei Modelle entwickelt: ein Streifenmodell und ein Modell einer Wehrfeldhälfte. Beide Modelle erlauben eine realitätsnahe, werkstoffabhängige Initialisierung der Schlauchmembran, eine anschließende Füllung und ein Aufbringen der ober- und unterwasserseitigen Belastung. Mit den Modellen wurden Parameterstudien durchgeführt und, auf Basis einer Datengrundlage von 370 Berechnungen, die Spannungskonzentrationen und die Faltenbildung analysiert.

Die Untersuchungen zeigen beispielsweise, dass je größer die Biegesteifigkeit der Membran ist, desto größer muss der erforderliche Innendruck sein, um eine vorgegebene Verschlusshöhe zu erzielen (Bild 2a). Außerdem ist festzustellen, dass die auftretenden (Biege-) Spannungen weniger von der Membrandicke als vom E-Modul abhängig sind (Bild 2b). Die Maximalspannungen sind dabei am Übergang von der Wehrschwelle zur Wehrwange zu beobachten (Bild 2c).

Aus Schadensfällen in der Vergangenheit war bekannt, dass Schlauchwehre aufgrund ihrer elastischen Struktur zu Schwingungen angeregt werden können. Im Modellversuch erwies sich eine Reihe von Störkörpern als wirkungsvolle Abhilfemaßnahme, die seit 2006 bei allen Anlagen in der WSV realisiert wurde und sich im Betrieb erfolgreich bewährt hat. Die Höhe der Störkörper beträgt aktuell 10 % der Schlauchhöhe, so dass sich bei großen Verschlusshöhen auch große Störkörper ergeben, deren Installation zunehmend schwieriger wird. Ziel der Bachelorarbeit von Freise (2013) war es, mit Hilfe von Laboruntersuchungen zu prüfen, wie Größe und Anordnung der Störkörper (Bild 3) das Schwingungsverhalten beeinflussen. Der Vergleich zeigte allerdings, dass die kleinen Störkörper Resonanzschwingungen nur bedingt unterdrücken und ihre Amplituden eine zu große Variabilität aufweisen. Aus diesen Gründen ist in der Praxis die Anwendung kleinerer Störkörper weniger geeignet.

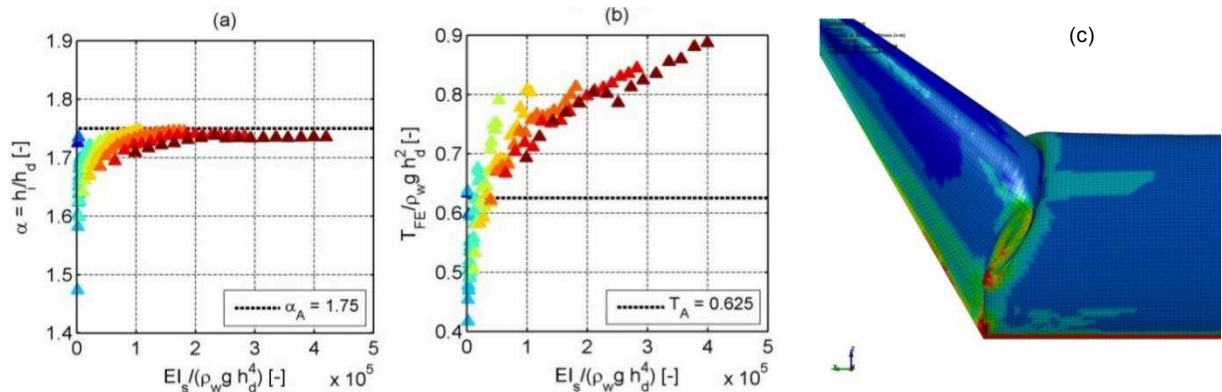


Bild 2: (a) Innendruckkoeffizient, (b) dimensionslose maximale Membrankraft in Abhängigkeit von der dimensionslosen Biegesteifigkeit, (c) Verteilung der Von-Mises-Vergleichsspannung (Gurt, 2013)

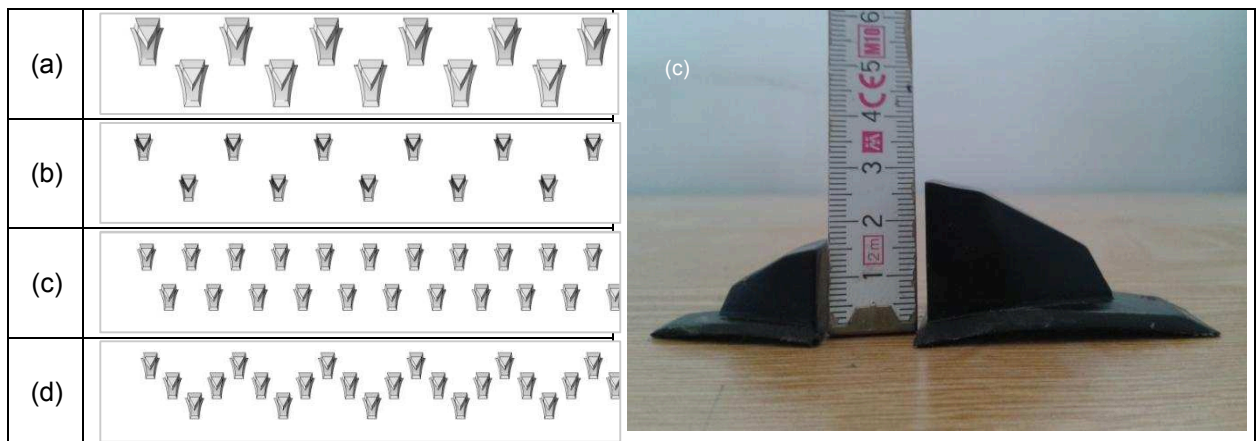


Bild 3: Untersuchte Störkörperreihen im Labormodell: (a) Original, (b) bis (d) Anordnungsvarianter kleinerer Störkörper und (e) Modelle der Störkörper (Freise, 2013)

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das FuE-Vorhaben ist abgeschlossen, der Abschlussbericht liegt seit November 2014 vor. Ursprünglich war geplant, die Ergebnisse zusätzlich in Form eines Merkblattes zusammenzufassen. Dies wird jetzt im Rahmen der Arbeit der PIANC Working Group 166 "Inflatable Structures in Hydraulic Engineering" erfolgen, die im Oktober 2013 ihre konstituierende Sitzung in Maastricht hatte.

Laufzeit des Vorhabens: 2008 bis 2014.

#### 5 Literatur

- Freise, S. (2013): Selbstinduzierte Schwingungen bei Schlauchwehren. Untersuchung verschiedener Abhilfemaßnahmen in einem Laborgerinne. Bachelor-Thesis am Institut für Wasser- und Gewässerentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, Bundesanstalt für Wasserbau (unveröffentlicht).
- Gurt, R. (2013): Untersuchungen zur Spannungskonzentration und Faltenbildung bei Schlauchwehren mit Hilfe nichtlinearer FEM-Analysen. Diplomarbeit am Institut für Mechanik, Karlsruher Institut für Technologie, Bundesanstalt für Wasserbau (unveröffentlicht).
- Rudolph, T. (2013): Untersuchungen zum Fischabstieg an Wehranlagen mit überströmten Wehrverschlüssen, Master-Thesis Hochschule Karlsruhe Wirtschaft und Technik, Bundesanstalt für Wasserbau (unveröffentlicht)

## 6 Veröffentlichungen

- Gebhardt, M. (2013): Inflatable Structures in Hydraulic Engineering. In: Proceedings of "SMART RIVERS Conference 2013", Liège, Belgien und Maastricht, Niederlande, 23.-27. September 2013.
- Gebhardt, M., Rudolph, T., Kampke, W., Eisenhauer, N. (2013): Untersuchungen der hydraulischen Bedingungen beim Fischabstieg über Schlauchwehre. In: BAW-Brief 03/2013.
- Gebhardt, M., Rudolph, T., Kampke, W., Eisenhauer, N. (2014): Fischabstieg über Schlauchwehre: Untersuchungen der Strömungsverhältnisse und Identifizierung der Abflussbereiche mit erhöhtem Verletzungsrisiko, In: Wasserwirtschaft 7/8, S. 48-53.
- Gebhardt, M., Rudolph, T., Kampke, W., Eisenhauer, N. (2014): Fischabstieg über Wehre am Beispiel des Schlauchwehres, In: Seminarunterlagen DWA-EnergieTage 2014, Bremen 7/8, S. 1-15.

## **Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen**

**Netzplan-Nr.:** A39530410035

**Projektleiter:** BOR T. Dettmann, Dipl.-Ing. R. Zentgraf, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Fachgruppe Schiffsführungssimulation (W 4), Referat Flusssysteme I (W 1)

**E-Mail:** thorsten.dettmann@baw.de, rolf.zentgraf@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Eine Optimierungsmethodik zur Befahrbarkeit von Flüssen unter Beachtung hydrodynamischer, fahrdynamischer und morphodynamischer Kriterien soll am Beispiel einer Referenzstrecke auf dem Rhein entwickelt werden. Das Forschungsvorhaben zielt darauf ab, mittels instationärer numerischer Modelle wasserstandsabhängig hydraulische Parameter zu ermitteln. Diese Parameter wie Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen sind Eingangsgrößen für ein zu entwickelndes Modell zur Berechnung und Bewertung fahrdynamischer Kenngrößen. Mit den Kenntnissen von Schiffsgeschwindigkeiten, Driftwinkeln, Fahrspurbreite u. a. m. können Verkehrsszenarien simuliert und der Verkehrsflächenbedarfs ermittelt werden. Mit der anschließenden Tiefenanalyse wird eine wasserstands- und verkehrsabhängige Bewertung der Befahrbarkeit einer Wasserstraße möglich.

Ziel ist es, eine Entscheidungshilfe zur Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen auf der Grundlage von berechneten Verkehrsflächenbedarf und der zugehöriger Tiefenanalyse zu erhalten.

Bei Beginn des Forschungsvorhabens existierten als einzige Berechnungsgrundlagen für die Einschätzung des Verkehrsflächenbedarfs von Binnenschiffen die Richtlinien für die Bemessung von Profilen in Schifffahrtskanälen und das Trassierungsverfahren TRASSE (seit 2011 Bestandteil der „Richtlinien für Regelquerschnitte von Binnenschifffahrtskanälen“), welches Schleppkurven eines sich bewegenden Schiffes ermittelt. Beide Verfahren gelten ausschließlich für nicht fließende Gewässer. Für fließende Gewässer standen HN-Modelle zur Verfügung, allerdings ohne Bezug zur Fahrdynamik von Binnenschiffen. Um auch Anfragen aus der WSV, die die Fahrdynamik in fließenden Gewässern betreffen, bearbeiten zu können, soll ein Modell entwickelt werden, welches mit den HN-Modellen der Flüsse gekoppelt wird und die Fahrdynamik von Binnenschiffen in fließenden Gewässern beschreibt.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Mit einem derartigen Modell wird es möglich werden, in schiffbaren Flüssen Breiten- und Tiefenengstellen zu identifizieren, deren Auswirkungen auf den Schiffsverkehr einzuschätzen und die Befahrbarkeit des Flusses zu optimieren. Darüber hinaus soll die Verwaltung bei der Zulassung neuer Schiffstypen beraten werden, indem die fahrdynamischen Eigenschaften neuer Schiffe schon bei Vorlage der Baupläne ermittelt und die Auswirkungen auf den Verkehr bei unterschiedlichen Abflüssen bewertet werden können.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Untersuchungsziel ist die Entwicklung eines Werkzeuges zur Unterstützung der WSV bei Fragestellungen zur

- Durchführung von fahrdynamischen Engpassanalysen (z. B. bei inzwischen abgeschlossenen Projekten am Rhein, Neckar),
- Beurteilung der Befahrbarkeit eines Flusses (z. B. bei inzwischen abgeschlossenen Projekten an der Saar, Weser),
- Festlegung von maximal möglichen Schiffsabmessungen bei unterschiedlichen Wasserständen (z. B. bei inzwischen abgeschlossenen Projekten am Rhein in der Gebirgsstrecke).

## 2 Untersuchungsmethoden

### Flussbauliche Modellierung

Der Bereich von Mainz (Rhein-km 498) bis Koblenz (Rhein-km 592) wurde zunächst als Modellstrecke für die Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen gewählt. Das 1D-HN-Modell stand bereits zur Verfügung und konnte im Laufe der Zeit für den gesamten frei fließenden Rhein zwischen Iffezheim (Rhein-km 333) und Lobith (Rhein-km 865) erweitert werden. Aus der Kenntnis des Ist-Zustandes heraus können für die Beurteilung der Fahrdynamik notwendige Parameter pegelbezogen für jeden Wasserstand und für jedes Querprofil berechnet werden. Für die Weiterentwicklung zu einem 2D-fahrdynamischen Modell stehen inzwischen 2D-HN-Modelle für zahlreiche Rheinabschnitte zur Verfügung, die in nächster Zeit zu einem geschlossenen 2D-HN-Modell des frei fließenden Rheins zusammengeführt werden. Sowohl die Fließgeschwindigkeiten als auch die Wassertiefen werden für die Nutzung innerhalb des Schiffsführungssimulators aufbereitet.

### Fahrdynamische Modellierung

Zur Berechnung der Fahrspurbreiten wurde ein hydrnumerisch/fahrdynamisches Modell für die stationäre Kreisfahrt entwickelt, wobei die Berechnung der Trägheitskräfte auf den Kirchhoffschen Bewegungsgleichungen für starre Körper beruht [Brix, J., 1993]. Unter Verwendung der Theorie schlanker Körper wird mit Hilfe einer lokalen Impulsanalyse im schiffsnahen Kontrollraum die auf den Schiffskörper wirkende hydraulische Querkraftverteilung ermittelt. Zusätzlich zu den Bewegungsgleichungen wurde das Modell mit einer virtuellen Navigation ausgestattet, welche auf der Grundlage der Wasserstraßengeometrie, der Abflussverhältnisse und der Verkehrsregeln ein Befahrbarkeitspotenzial des Gewässers ermittelt und daraus eine dem Optimum nahe Kursachse konstruiert. Unter dem Arbeitstitel PeTra 2D wurden auf Grundlage des beschriebenen fahrdynamischen Modells die 3 Bewegungsgleichungen für eine horizontale Bewegung hergeleitet, wobei Strömungsgeschwindigkeiten eines tiefengemittelten 2D-Strömungsfeldes berücksichtigt werden [Kolarov, P., 2006]. In diesem Verfahren werden die Schiffe nicht mehr geschleppt, sondern durch aufbringen von Ruderkräften gesteuert. Nach ersten erfolgreichen Tests des Verfahrens stellte sich heraus, dass die Schiffe mit Hilfe von Autopiloten nur begrenzt gefahren werden können. Eine Manöverfahrt ist nur durch einen Schiffsführer zu simulieren. Mit der Beschaffung des Schiffsführungssimulators im Dezember 2009 wurde eine leistungsfähige Plattform für die Weiterentwicklung fahrdynamischer Berechnungsansätze geschaffen. Damit können zukünftig qualitativ hochwertig Themen zur Navigation in Flüssen behandelt werden. Die Entwicklungen im Zusammenhang mit dem Binnenschiffsführungssimulator erfolgen im Rahmen des Forschungsvorhaben A39530410099 - Binnenschiffsführungssimulation.

## 3 Ergebnisse

Mit dem Abschluss dieser Grundlagenentwicklung gingen auch der Abschluss der Entwicklungen und Tests der Verfahren PeTra 1D und BoatSim einher. Das Verfahren PeTra 1D liegt als MicroStation-Applikation vor, so dass es direkt in der Arbeitsumgebung der WSV eingebettet ist. Das Verfahren BoatSim wird weitgehend vom Schiffsführungssimulator ersetzt. Die fahrdynamische Richtigkeit dieses Verfahrens wurde an Hand von Vergleichen mit Naturmessungen im Rahmen von Projekten, bei denen das Verfahren eingesetzt und dokumentiert wurde, getestet. Mit Einführung der neuen „Richtlinien für Regelquerschnitte von Binnenschifffahrtskanälen“ wird für fahrdynamische Bewertungen der Einsatz von dem Verfahren PeTra1D in Zusammenarbeit mit einem HN Modelle des zu untersuchenden Flusses empfohlen.

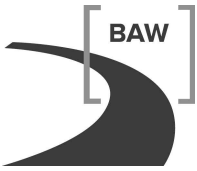
## 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Entwicklungsarbeiten dieses FuE-Vorhabens sind abgeschlossen. Der Forschungsbericht wurde im Jahr 2014 fertig gestellt.

Laufzeit des Vorhabens: 1996 bis 2014.

## 5 Literatur

Brix, J. (1993): Manoeuvring technical manual. Seehafenverlag Hamburg



Kolarov, P.(2006): Simulation von Schiffsbewegungen im Fließgewässer. Forschungsbericht der Universität Rostock. Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik. Lehrstuhl Meerestechnik. Rostock

## **6 Veröffentlichungen**

Dettmann, T., Zentgraf, R. (2014): Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben "Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen". Bundesanstalt für Wasserbau. Karlsruhe

## **Mindestabstände Schiff-Sohle zur Vermeidung von Steinschlägen**

**Netzplan-Nr.:** A39530410037

**Projektleiter:** Prof. Dr.-Ing. B. Söhngen Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W4)

**E-Mail:** bernhard.soehngen@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Bei einer grobkörnigen Gewässersohle können bei kleinen Flottwassertiefen Sohlpartikel vom Schiffspropeller angesaugt werden und ihn dadurch beschädigen. Das Mindestflottwasser, mit dem Steinschlagschäden vermieden oder zumindest begrenzt werden können, stellt eine wichtige Eingangsgröße bei der Dimensionierung von Sohlsicherungsmaßnahmen dar.

In den vergangenen Jahren wurden bereits an einigen Forschungsinstituten Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt. Bisher konnte aber noch kein befriedigender Ansatz für eine Bestimmung bzw. die Bewertung des potentiellen Steinschlags infolge des Ansaugens durch einen Schiffspropeller gefunden werden. Eine genauere Beschreibung und Berechnung dieses Problems ist aber aufgrund der größer werdenden Tiefgänge und damit der stärkeren Nutzung der Tiefenverhältnisse, der stärker werdenden Motorisierung der Schiffe und des daraus resultierenden Anstiegs der Tendenz zum Ansaugen von Steinen von großem Interesse.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Das Mindestflottwasser bestimmt in Kanälen die erforderliche Kanalwassertiefe bzw. in einem natürlichen Fluss, der z. B. mit einer Grobkornanreicherung gegen Erosion geschützt werden soll, bei vorgegebener Wassertiefe die mögliche Abladetiefe. Die Steinschlagproblematik hat somit Einfluss auf die volkswirtschaftlichen Kosten bzw. Nutzen einer Wasserstraße.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ein grundlegendes Untersuchungsziel besteht in der Klärung der Randbedingungen, bei denen Steine angesaugt werden („Tornado“-Phänomen“), um bestehende Ansätze zur Prognose der Ansaugwahrscheinlichkeit zu verifizieren bzw. zu verbessern. Langfristiges Ziel des Vorhabens ist es, die in der BAW entwickelten Verfahren zur Befahrbarkeitsanalyse im Hinblick auf den Aspekt Steinschlagschäden weiter zu entwickeln. Dadurch sollen insbesondere Prognosen zur Ermittlung praxisnaher Abladetiefen verbessert werden. Dabei ist der betriebswirtschaftliche Nutzen größerer Abladetiefen, insbesondere bei Niedrigwasser, den möglichen Schäden an den Schiffspropellern, gegenüber zu stellen, um die Entscheidung der Schiffsführer nachzuvollziehen.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Zur Vertiefung theoretischer Grundlagen zum Ansaugen von Steinen durch Schiffspropeller und verbesserten Prognosen von Mindestabständen zur Vermeidung von Steinschlägen wurden Sondierungsgespräche mit dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) der Universität Braunschweig durchgeführt, um nach abschließenden Untersuchungen zum Forschungsvorhaben „Einwirkung des Propellerstrahls auf die Gewässersohle“ (Netzplan-Nr.: A39530410038) mit der vorhandenen Versuchseinrichtung weiterführende Untersuchungen zum vorliegenden Forschungsvorhaben durchzuführen. Hierzu wurde vom LWI ein Angebot unterbreitet, das die nachstehenden Bearbeitungsschwerpunkte beinhaltet:

1. Literaturrecherche und Analyse der bisher durchgeführten Modell- und Naturversuche
2. Bestimmung der Randbedingungen für die „Tornado“-Entstehung
3. Untersuchung des Tornadoströmungsfeldes in der Manöversituation mit unterschiedlichen Schiffspropellern

4. Transportweg und Menge des angesaugten Sohlmaterials - Manöverversuche
5. Untersuchungen zum Einfluss von Strömung und Fahren

### 3 Ergebnisse

Die bisherigen Erkenntnisse stützen sich überwiegend auf Modelluntersuchungen am DST in Duisburg und Naturuntersuchungen zum Zusammenhang von Mindestflottwasser und Ansaugbeginn sowie zu den Propellerschäden bei angesaugten Steinen. Hieraus konnte ein vereinfachtes Modell für die Ansaugwahrscheinlichkeit und die Schadensakkumulation bei bestimmten schiffahrtlichen und sedimentologischen Randbedingungen entwickelt werden. Obwohl es nunmehr durch das Verfahren BSquat möglich wird, die wichtigsten Eingangsgrößen zur Ermittlung der Ansaugwahrscheinlichkeit, das Flottwasser, die Schiffsgeschwindigkeit und die Propellerdrehzahl eines Binnenschiffes bei gegebener Abladetiefe und praxisüblichem Leistungseinsatz der Antriebsorgane realitätsnah zu berechnen, sind Prognoseberechnungen der Ansaugwahrscheinlichkeit und des damit verbundenen Schadenspotenzials, wegen der noch nicht verifizierten Ansätze derzeit nicht verlässlich möglich. Dies vor allem deshalb, weil immer noch nicht vollständig geklärt ist, welcher Mechanismus das Ansaugen der Steine tatsächlich auslöst. Um diese Frage abschließend zu klären, sind die im Punkt 2 angeführten Modellversuche am Leichtweiß-Institut der Universität Braunschweig (LWI) vorgesehen. Diese Untersuchungen wurden jedoch zugunsten des Vorhabens A39530410038, das wegen seines Bezugs zu laufenden Aufträgen zügig zum Abschluss gebracht werden soll, zeitlich zurückgestellt.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das FuE-Projekt wurde in 2014 abgeschlossen.

Laufzeit des Vorhabens: 2001 bis 2014.

### 5 Literatur

- Maaß, D. , Söhngen, B. (2008): Ruderquer- und Längskräfte für Düsenpropeller - Berechnungsansätze und Kalibrierung anhand von Modellversuchen des DST (Bericht 1889). 1. Praxisbericht für das BA – Studium von Herrn Maaß in Karlsruhe. BAW-intern, Dezember 2008.
- Wassermann, S., Söhngen, S., Dettmann, T., Heinzelmann, C. (2010): Untersuchungen zur Bestimmung von Fahrrinnenmindestbreiten für Binnenwasserstraßen. PIANC-Kongress Liverpool (mit Widerstandsformel).

### 6 Veröffentlichungen

-/-



**Ermittlung notwendiger Fahrrinnenbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt****Netzplan-Nr.:** A39530470001 (KLIWAS PJ 4.04)**Projektleiter:** Prof. Dr.-Ing. B. Söhngen, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Schiff/ Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W4)**E-Mail:** bernhard.soehngen@baw.de, michael.paprocki@baw.de**1 Problemstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Das Forschungsprogramm KLIWAS des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung soll klimabedingte Änderungen auf Wasserstraßen für den Zeitraum bis 2100 abschätzen. KLIWAS trägt dazu bei, den umweltfreundlichen Verkehrsträger Wasserstraße leistungsfähig zu erhalten und dabei ökologische und ökonomische Aspekte gleichermaßen zu berücksichtigen. Die BAW ermittelt im Teilprojekt 4.04 u. a. am Beispiel der Anpassungsoption der abgestuften Fahrrinne die notwendigen Mindestfahrrinnenbreiten. Im Rahmen der wasserbaulichen Untersuchungen im KLIWAS-Teilprojekt 4.03 wird geprüft, ob durch Reduzierung der Breite der Fahrrinne mit begrenztem Aufwand bei Niedrigwasser durchgängig eine größere Tiefe erreichbar ist.

Technischer Standard bei der Fahrrinnendimensionierung ist die Anwendung von Trassierungsverfahren. Diese sind nach Ergebnissen eines früheren BAW-FuE-Vorhabens nur bei schwach eingeschränktem Fahrwasser und geringen Querströmungsgeschwindigkeiten aussagefähig. Zudem müssen Einflüsse z. B. aus dem „human-factor“ oder starker Turbulenz durch Zuschläge berücksichtigt werden. Hinsichtlich des Verkehrsflächenbedarfs können die Ergebnisse solcher Trassierungen z.T. weit auf der unsicheren Seite liegen.

Die Anwendung von Schiffsführungssimulatoren haben diese Einschränkungen generell nicht. Einflüsse aus instationärer Turbulenz oder extrem eingeschränkter Fahrwasserverhältnisse in Tiefe oder/und Breite führen allerdings auch diese genauen Verfahren immer noch an ihre Grenzen. Deshalb und vor allem wegen des großen Aufwandes zur statistisch angemessenen Berücksichtigung des „human-factor“ durch eine entsprechend große Anzahl von Simulatorfahrten mit verschiedenen Schiffsführern werden im Rahmen des vorliegenden KLIWAS-Projektes sowohl empirische Methoden, die möglichst nahe an Messwerten zum Verkehrsflächenbedarf bleiben und deterministische Simulationsverfahren mit Autopilotierung eingesetzt. Die letzteren vor allem deshalb, weil sie einen direkten Variantenvergleich ermöglichen, der diesbezüglich nicht von „human-factor“-Effekten überprägt ist.

Hierzu dient das experimentelle fahrdynamische Modell PeTra2D, das die BAW zusammen mit der Universität Rostock entwickelt hat. Es ist der Lage, den Verkehrsflächenbedarf im seitlich und tiefenmäßig begrenzten Fahrwasser mit begrenztem Aufwand für verschiedene Fahrzeuge realistisch abzubilden.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Um die volkswirtschaftlichen und ökologischen Vorteile der Binnenschifffahrt als Verkehrsträger zu erhalten, muss die WSV geeignete Maßnahmen für den Fall treffen, dass extreme Wasserstände zukünftig tatsächlich häufiger eintreten und länger andauern. Da die Effizienz vieler Anpassungsoptionen stark von der angestrebten Fahrrinnenbreite abhängt, sind nicht nur aus wirtschaftlichen Gründen, sondern auch aus Gründen der Sicherheit zuverlässige Modellprognosen notwendig. Die geplanten Modellverbesserungen, die Auswertungen von Naturdaten im Rahmen von KLIWAS und die resultierenden Empfehlungen für Anpassungsoptionen bedienen gleichzeitig Fragestellungen der Projektgruppe „Abladeoptimierung Mittelrhein“.

**1.3 Untersuchungsziel**

Ziel des Projektes ist es, Mindestbreiten der Fahrrinne für eine sichere und leichte Schifffahrt in Abhängigkeit verschiedener zukünftig möglicher hydrologischer und nautischer Bedingungen, Flotteneigenschaften, Informationssysteme und flussbaulicher Anpassungsoptionen am Beispiel der abladebe-

schränkenden Tiefenengpässe des Mittelrheins zwischen Mainz und St. Goar abzuleiten. Weiteres Ziel ist, nachzuweisen, dass die am Mittelrhein entwickelte und erprobte Systematik zur Ableitung von Mindestbreiten zur Anwendung auf andere Wasserstraßenabschnitte übertragbar ist.

## 2 Untersuchungsmethoden

Die erforderlichen Mindestbreiten werden mit Hilfe von Naturdaten und fahrdynamischer Modelle bestimmt. Diese müssen die Instabilität des Schiffspfades, die verminderte Ruderwirkung bei geringen Wassertiefen, den Einfluss moderner Steuereinrichtungen, Autopiloten und verbesserte Informationssysteme auf zukünftigen Schiffen berücksichtigen. Der Einfluss von menschlichen Fähigkeiten und einer evtl. Häufung von Fahrfehlern aufgrund der erhöhten Anforderungen an den Schiffsführer unter Engpassbedingungen ist gleichfalls zu berücksichtigen. Hierfür werden derzeit überwiegend semiempirische Ansätze auf Basis von Naturdaten angewendet. In einem weiteren Schritt ist die Entwicklung eines „human-factor“-Modells in einem Autopiloten, der die zweidimensionalen fahrdynamischen Modelle steuert, vorgesehen. Die um den „human-factor“ erweiterte Autopilotierung soll künftig statistisch vergleichbare Simulationen für verschiedene denkbare Zukunftsszenarien und für verschiedene Anpassungsoptionen ermöglichen. Sie soll so eine Entscheidungsgrundlage für die Konzeption zukünftiger Maßnahmen liefern.

Das oben erwähnte semiempirische Modellverfahren (EMP) beruht auf einer Vielzahl von Messdaten ausgewählter Fahrzeuge, deren Kurswege, Schiffsgeschwindigkeiten, Quer- und Drehbeschleunigungen und Fahrspurbreiten aufgezeichnet wurden. Diese Daten werden geometrisch und spektralanalytisch hinsichtlich deterministischer und zufälliger, turbulenzbedingter und dem „human-factor“ zugeordneter Zusatzbreiten ausgewertet. Aus der Analyse dieser Daten werden semiempirische Gleichungen z. B. zum Einfluss der Instabilität des Schiffspfades und der Reaktion der Schiffsführer auf die Zusatzbreiten abgeleitet. Diese Ansätze werden genutzt, um, aufbauend auf den Messdaten, die Mindestbreiten für nicht beobachtete Randbedingungen hinsichtlich Größe der Schiffsgefäße oder Strömungsgeschwindigkeiten bzw. Wasserstände abzuleiten. Darauf folgen dann, letztlich abgeleitet aus Naturdaten aus dem Projektgebiet, die gesuchten Mindestbreiten.

Diese Methodik kann auch auf andere Wasserstraßen angewendet werden. Der zugehörige Aufwand ist begrenzt, da die Naturdaten durch Dauermessungen, ohne dass eine Messmannschaft auf den Fahrzeugen zugegen sein muss, erhoben werden können. Auch die Analyse der Daten konnte weitgehend automatisiert werden. Voraussetzung zur Anwendung der Verfahren, ist die Verfügbarkeit mehrdimensionaler numerischer Strömungsmodelle, um z. B. den Einfluss von Querströmungen analysieren zu können.

## 3 Ergebnisse

Auf Grundlage der in den vorangegangenen Berichtszeiträumen erhobenen und ausgewerteten fahrdynamischen Naturuntersuchungen, wurde ein vorhandenes Verfahren, welches für Fahrrinnenbemessungen am Neckar Verwendung fand, für die Anwendung am Mittelrhein herangezogen und es wurden Anpassungen und Erweiterungen an die hier obliegenden Erfordernisse durchgeführt. Die in den Naturdaten enthaltenen Informationen, die mit den Programmen FAHRDYN (u. a. Kursachsen, Schleppflächen, generell deterministische Anteile der Fahrrinnenbemessung) und CfAA (Quer- und Drehbeschleunigungen und daraus ermittelte Zusatzbreiten aus Instabilitäten und „human-factor“) aufbereitet werden, wurden in Verbindung mit 2D-Strömungsgeschwindigkeiten aus den TELEMAC-Simulationen im TP 4.03 zur Bestimmung idealisierter Fahrspuranteile aus Kurvenfahrt, Traversierung und Instabilitäten herangezogen. Durch einen SOLL-IST-Abgleich zwischen Theorie und Messung werden die Formeln zur Ermittlung der Fahrspuranteile kalibriert. Im Ergebnis ergeben sich Mindestbreiten der Fahrrinne mit ihrer Streubreite, denn die Prognosen erfolgen auf Basis verschiedener Messfahrten. Hierfür wurde auf Grundlage der Messdaten (Auswahl aus je 11 Tal- und Bergfahrten) Prognosen für das genannte Szenarium ermittelt und diese gemittelt.

Für die Aufteilung der aus Naturdaten abgeleiteten Fahrrinnenbemessungsanteile (nach Anteilen der Kurvenfahrt, des Vorhaltens gegen Querströmungen, der Abdrift im Querströmungsfeld und des „human-factors“ im Abgleich mit der Theorie), die Extrapolation auf bemessungsrelevante Szenarien, die

Durchführung der Mittelung mehrerer Fahrten und die Berechnung von Sicherheitsabständen, wurde eine Nutzeroberfläche entwickelt (Bild 2).

Das Verfahren wird für Anwendungen, die über das KLIWAS-Projekt hinausgehen, konkret zur Bearbeitung eines Auftrages zur Überprüfung der Fahrrinnenbreiten am gesamten freifließenden Rhein, stetig weiterentwickelt. Ohne die im Rahmen des FuE-Vorhabens erfolgten Modellentwicklungen wäre dies nicht möglich gewesen.

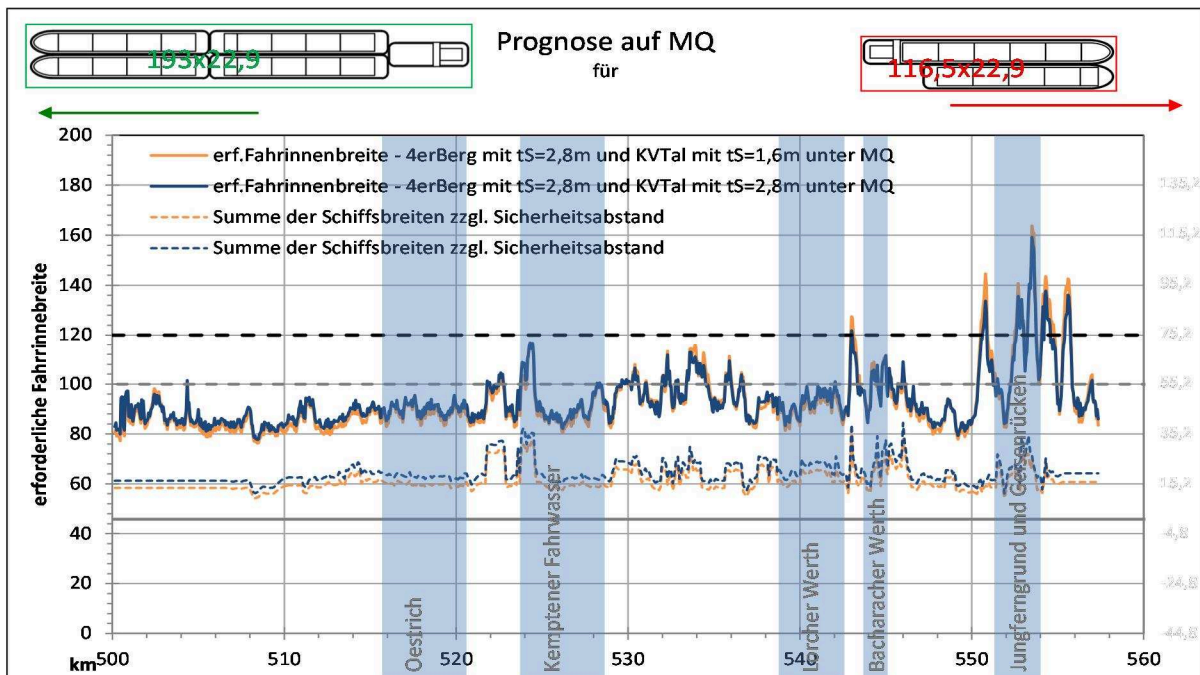


Bild 1: Begegnung eines 4er-Schubverbands zu Berg und eines Koppelverbands zu Tal

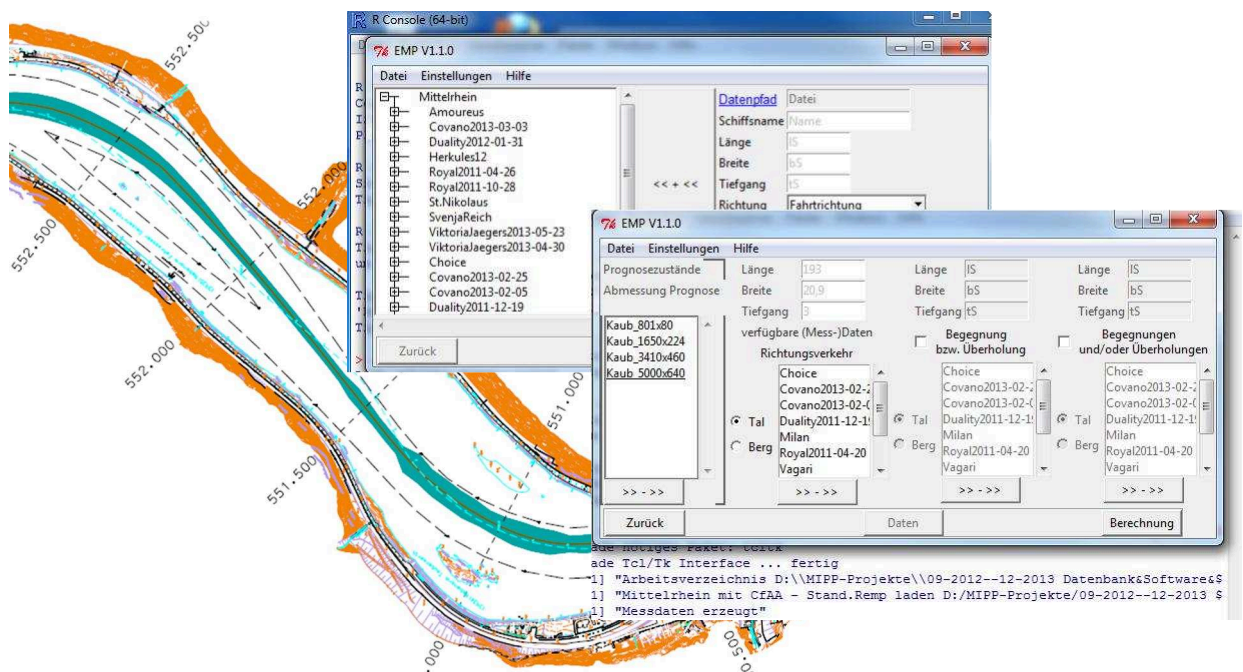


Bild 2: Nutzeroberfläche EMP

Weiter wurden die ermittelten Mindestbreiten aus dem skizzierten semi-empirischen Ansatz mit denen des zweidimensionalen fahrdynamischen Modellverfahren PeTra2D hinsichtlich der deterministischen Bemessungsanteile an kritischen Engstellen verglichen. Die Übereinstimmung war unter Beachtung des in der Praxis häufig erfolgten Bugrudereinsatzes an Breitenengstellen gut.

Die ursprünglich angedachte Entwicklung eines „human-factor“-Ansatzes im Rahmen eines modifizierten Autopiloten für PeTra2D konnte im TP.4.04 nicht mehr erfolgen, u. a. weil die Modellentwicklung von PeTra2D den Anforderungen nicht Schritt halten konnte. Die Weiterentwicklung dieses Konzeptes ist in den KLIWAS-Folgevorhaben vorgesehen.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das FuE-Vorhaben wurde in 2013 abgeschlossen und der Abschlussbericht in 2014 vorgelegt. Die Abstimmung der Endfassung des Berichtes für das BMVI erfolgt im März 2015.

Laufzeit des Vorhabens: 2008 bis 2014.

#### 5 Literatur

-/-

#### 6 Veröffentlichungen

Dettmann, T.; Söhngen, B. (2010): Fahrdynamische Modellverfahren. Vortrag: BAW-Kolloquium „Forschung und Entwicklung im Binnenverkehrswasserbau“. Karlsruhe, 2./3. März 2010. Veröffentlichung: Tagungsband

Heinzelmann, C.; Söhngen, B. (2010): Von Taktischen Drehpunkt zum Schiffsführungssimulator - Modellverfahren zur Fahrrinnenbemessung. Vortrag: 40. Internationales Wasserbausymposium Aachen (IWASA) „Innovative Methoden und Ansätze in Wasserbau und Wasserwirtschaft“, Aachen, 7. Januar 2010. Veröffentlichung: Tagungsband (Heinzelmann, C.; Söhngen, B.; Dettmann, T.)

Schmidt, A. (2011): Untersuchungen zu verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen an extreme Niedrigwassersituationen am Beispiel des Rheins. Vortrag: HTG-Kongress, Würzburg, 7. bis 10. September 2011. Veröffentlichung: Tagungsband (Schmidt, A.; Wurms, S.; Hahne, L.; Söhngen, B.)

Söhngen, B.; Wassermann S. (2009): Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Schifffahrtsverhältnisse am Rhein. Vortrag: ZKR Kongress „Rheinschifffahrt und Klimawandel – Herausforderung und Chance“, Bonn, 26./27. Juni 2009.

Söhngen, B. (2010): Investigations to define minimum fairway widths for inland navigation channels. Vortrag: 32. PIANC Congress, Liverpool, Großbritannien, 12. bis 14. Mai 2010. Veröffentlichung: Tagungsband (Söhngen, B.; Dettmann, T.; Heinzelmann, C.)

Söhngen, B.; Wassermann, S. (2010): Ermittlung notwendiger Mindestfahrrinnenbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt. Vortrag: KLIWAS-Plenum, BfG, Koblenz, 6. September 2010.

Söhngen, B. (2010): Erforderliche Fahrrinnenbreiten in Flüssen. Vortrag: Workshop zum Thema „Zukunftsorientierte Fahrrinnenparameter für die Wasserstraße Donau“, Donaukommision, Budapest, Ungarn, 29. September 2010.

Söhngen, B. (2010): Untersuchung einer Fahrrinne in der Fahrrinne für Teilstrecken des Mittelrheins als einer der möglichen Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Veröffentlichung: Tagungsband zum 31. Duisburger Kolloquium Schiffstechnik/Meerestechnik 2010 (erschienen 2011)

Wurms, S. (2011): Additional navigational width of inland vessels passing cross current fields. Vortrag: Smart Rivers 2011 Conference, New Orleans, Louisiana, USA, 13. bis 16. September 2011. Veröffentlichung: Homepage der Smart Rivers 2011 Conference ([http://smart11.pianc.us/ag\\_techprog.cfm](http://smart11.pianc.us/ag_techprog.cfm)) (Söhngen, B.; Maedel, N.; Hahne, L.; Verdugo, I.; Iribarren, J.)

Söhngen, B; Paprocki M. (2013): Mindestbreiten der Fahrrinnen für eine sichere und Leichte Schifffahrt. Schlussbericht Teilprojekt 4.4 Koblenz, 2013 KLIWAS Schriftenreihe

## **AufMod - Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht**

**Netzplan-Nr.:** A39550270116

**Projektleiter:** Dr.-Ing. H. Heyer, Dienststelle Hamburg

**E-Mail:** harro.heyer@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

Seit etwa drei Jahrzehnten werden mathematische, prozessbasierte Simulationsmodelle entwickelt und gepflegt, mit denen Wasserstände, Strömungen, Seegang und der Transport im Wasserkörper gelöster Substanzen berechnet werden, und darüber hinaus auch der Transport von Sedimenten abgeschätzt werden kann. Darauf aufbauend werden mögliche Veränderungen der Bathymetrie (Morphodynamik) und der Sedimentologie bestimmt. Diese Simulationsergebnisse zur Morphodynamik können die Natur nicht vollkommen nachbilden. Bis heute ist es nicht gelungen, Methoden bereit zu stellen, mit denen ein skalenübergreifendes Simulationsmodell als zusammenhängendes Untersuchungsgebiet für die variable ortsspezifische Morphodynamik in einem sehr großen Gewässersystem umfassend validiert und analysiert werden kann.

Zur Beurteilung und Verbesserung der morphodynamischen Simulation werden in einem gemeinsamen interdisziplinären KFKI-Forschungsvorhaben (03KIS082-088) Modellsysteme für die großräumige und langfristige Morphodynamik in der Deutschen Bucht in Wechselwirkung mit den Ästuaren (Seeschiffahrtsstraßen) schrittweise aufgebaut. Die erforderlichen Grundlagen, Methoden und Modellbausteine werden von den Ressortforschungseinrichtungen BAW und BSH, den Universitäten in Kiel (Institut für Geowissenschaften, Exzellenzcluster „Future Ocean“, Forschungs- und Technologiezentrum Westküste) und in Bremen (Zentrum für marine Umweltwissenschaften), der Universität der Bundeswehr in München, der Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung in Wilhelmshaven und der smile consult GmbH in Hannover entwickelt und deren Ergebnisse zur gegenseitigen Nutzung zur Verfügung gestellt. Das Vorhaben wurde Anfang 2010 unter der Leitung der BAW gestartet und wird über drei Jahre gefördert; es endete am 31.12.2012. Es ist geplant, wesentliche Ergebnisse des Vorhabens für den Aufgabenkatalog der Ressortforschung zu übernehmen, um Herausforderungen der Zukunft bewältigen zu können, die mit wichtigen Fragen zu den zukünftigen Belastungen und Veränderungen der Küstengewässer (Klimawandel) und zum vorausschauenden Management der Seeschiffahrtsstraßen verbunden sind.

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die morphodynamischen Aktivitäten und Wechselwirkungen in der Nordsee, der Deutschen Bucht mit ihrer amphibischen Küstenzone (Wattenmeer) und den Tideästuaren werden im Detail untersucht und analysiert. Die eingesetzten Simulationsmodelle sind in der Lage, das Spektrum der kleinen, mittleren und großen Raumskalen zu berücksichtigen. Die Simulation erfolgt auf Grundlage vorhandener Modellverfahren, die dem Stand der Wissenschaft entsprechen. Es werde alle vorhandenen Daten zur Sedimentologie und zur Formenvielfalt des Gewässerbodens zusammengetragen und durch aktuelle innovative Messungen ergänzt. Auf dieser Grundlage können realitätsnahe Modellparameter für die Simulationen gewonnen werden. Als meteorologische Randwerte werden Windfelder in ihrer zeitlichen und räumlichen Variabilität berücksichtigt. Diese enthalten somit auch die Extremereignisse.

Die BAW trägt zum Gesamtvorhaben durch 3D-Modellierungen des Gesamtsystems Nordsee, Deutsche Bucht, Wattenmeer und Ästuare in hoher Auflösung bei. Die Modellvalidierung erfolgt für Zeitspannen von mehreren Jahren auf der Grundlage konsistenter bathymetrischer Daten. Eingesetzt werden Modellverfahren zur Berechnung der Wasserstände, Strömungen, Salzgehalte, Schwebstofftransporte, Sedimenttransporte am Boden, des Seegangs und der von diesen Prozessen ausgelösten Veränderungen der Morphologie. Zur Einschätzung der numerischen Lösungsverfahren werden zwei verschiedene Modellsysteme verwendet: Das unstrukturierte hydrodynamische Modellverfahren UnTRIM gekoppelt mit dem Sedimentmodul SediMorph und dem Seegangmodell UnK einerseits und das hydro-morphodynamische Verfahren Delft3D mit dem Seegangmodell SWAN andererseits.

## 1.2 Bedeutung für die WSV

Die WSV benötigt im Rahmen der Unterhaltung und des Ausbaus spezielle Beratungsleistungen der BAW. Die BAW benötigt hierfür eine umfangreiche Wissensbasis zur Einschätzung der Sedimentbewegung und der geomorphologischen Entwicklungen im Küstenvorfeld und in den Ästuaren. Hieraus sollen zukünftig notwendige Grundlagen und Eingangsgrößen für die vielfältigen lokalen Untersuchungen und Prognoserechnungen gewonnen werden.

Die Modellsysteme sollen für heutige Verhältnisse und für zukünftig mögliche Verhältnisse unter erwarteten Klimaänderungen langfristig eingesetzt und weiter entwickelt werden.

## 1.3 Untersuchungsziel

Das Forschungsziel des Verbundprojektes ist die Vertiefung der Kenntnisse über die großräumige und langfristige Morphodynamik in der Deutschen Bucht. Die für die Aufgaben der WSV zu gewinnende Wissensbasis wird durch das interdisziplinäre Vorgehen gesichert. Vorhandene Methoden und Verfahren sind zu erweitern und fachlich zu qualifizieren. Der Fokus liegt dabei auf der deutschen Nordseeküste mit dem Küstenvorfeld, den Vorstränden / Stränden, den Inseln und Wattgebiete sowie den Mündungsbereichen der Tideflüsse. Im konzeptionellen Projektansatz werden insbesondere Computermodelle berücksichtigt. Die Prognosefähigkeit der Modelle ist systematisch und vergleichend zu bewerten. Der Anforderungskatalog ist sehr umfangreich und kann deshalb nur im Rahmen eines multidisziplinären Verbundprojektes bewältigt werden.

## 2 Untersuchungsmethoden

Unverzichtbare Grundlage der gesamten Untersuchungen ist der Aufbau eines umfassenden Bodenmodells, das plausibilisierte, konsistente Daten für Bathymetrie, Bodenformen und Sedimentologie für mehrere Jahre enthält. Das Bodenmodell dient einerseits als Datengrundlage für den Betrieb der Simulationsmodelle und andererseits erzeugt es Informationen zur Validierung / Kalibrierung dieser Modelle. Darüber hinaus wird von einem Projektpartner eine Studie zur Verteilung, Dynamik und Wirkung von Bodenformen (Transportkörper, Dünen am Gewässerboden) erarbeitet. Resultate dieser Untersuchungen sollen als Elemente in den numerischen Modellsystemen zur Verbesserung der Simulationsergebnisse beitragen.

Zur Untersuchung und Dokumentation der Streubreite verschiedener morphodynamischer Modelle werden in der Bundesanstalt für Wasserbau, dem Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München und der smile consult GmbH umfassende Untersuchungen mit vergleichbaren Grundlagen aber verschiedenen Modellverfahren und Zielrichtungen durchgeführt. Diese Simulationen sind aufeinander abgestimmt und ergänzen sich in sinnvoller Weise, so dass mit dem Abschluss des Projekts die derzeitigen Möglichkeiten und Grenzen der morphodynamischen Simulation umfassend dokumentiert werden können.

## 3 Ergebnisse

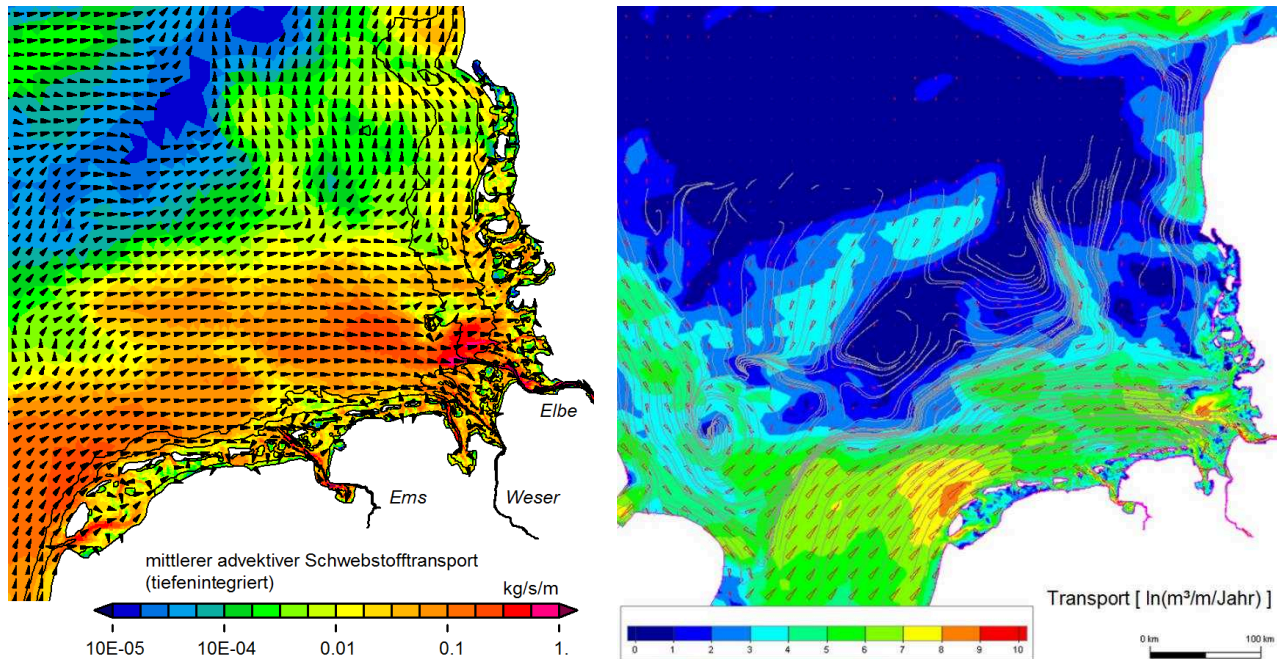
Um in der Lage zu sein, die morphodynamische Entwicklung naturähnlich zu berechnen, ist es zunächst erforderlich die Schwebstofftransporte möglichst korrekt abzubilden.

In Bild 1 ist dazu eine Analyse der mittleren advektiven Schwebstofftransportvektoren für eine Zeitspanne von einem Jahr (2006) dokumentiert. Die zu Grunde liegenden Berechnungen kombinieren die Wirkung von Gezeiten, Seegang und windgetriebener Zirkulation mit sechs unterschiedlichen Fraktionen (Feinsand, sehr feiner Sand, Grob-, Mittel- und Feinschluff, sowie sehr feiner Schluff).

Aus der kombinierten Wirkung von Gezeiten, Seegang und windgetriebener Zirkulation wurden die resultierenden Sedimenttransportgrößen (Vektoren) ausgewertet. Auf diesem Vektorfeld wurden im Sinne einer Tracerverfolgung die Pfade der resultierenden Transporte berechnet (siehe Bild 2).

Die im Projekt AufMod erarbeiteten Untersuchungsergebnisse werden in einer Datenbank offen für die Nutzung durch Dritte eingestellt und bilden somit die Grundlage zur Beantwortung weitergehender Fragestellungen im Bereich der Ästuare sowie der Bundeswasserstraßen. Die Recherche / Nutzung der Ergebnisse erfolgt über die im Rahmen des Forschungsprojektes NOKIS bereits aufgebaute

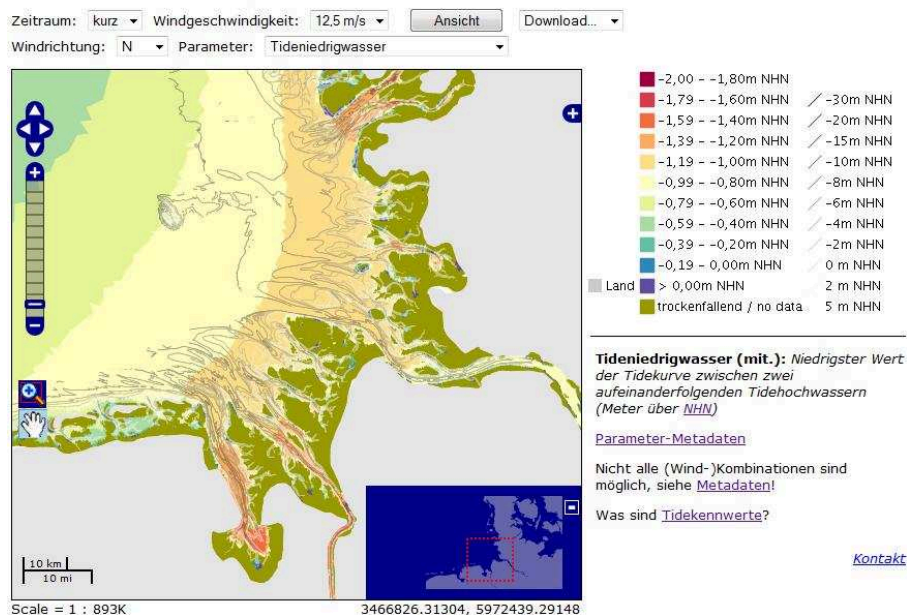
Daten- und Informationsplattform. Erweitert wird der Zugriff durch das Forschungsprojekt Marine Dateninfrastruktur Deutschland (MDI-DE) in das dieses Verbundprojekt eingebunden ist. Unter anderem werden auf einer eigenen Projektseite Daten beschrieben und bereitgestellt (<http://projekt.mdi-de.org/services/verwandte-projekte/40-aufbau-von-integrierten-modellsystemen.html>) wie zum Beispiel ein Atlas von berechneten Tidekennwerten (vgl. Bild 3).



**Bild 1:** links: Mittlerer advektiver Schwebstofftransport in der Deutschen Bucht (Jahresmittel 2006)

**Bild 2:** rechts: Sedimenttransportpfade (Analyse aus den resultierenden Transportvektoren eines Jahres)

Tidekennwertatlas



**Bild 3:** Tidekennwertatlas auf der MDI-DE Seite für AufMod

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2014: Vorarbeiten und Abstimmung zur Veröffentlichung in der Fachzeitschrift „Die Küste“ (Heft 80); Erstellung des Abschlussberichts.

Laufzeit des Vorhabens: 2009 bis 2014.

#### 5 Literatur

Winter, C. (2011): Macroscale morphodynamics of the German North Seacoast. Journal of Coastal Research (57)

#### 6 Veröffentlichungen

Heyer, H. und Schrottke, K.(2013): Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht : AufMod - gemeinsamer Abschlussbericht für das Gesamtprojekt mit Beiträgen aus allen 7 Teilprojekten, DOI: 10.2314/GBV:780783271

Kösters, F. (2011): "Using UnTRIM2007 in large scale applications: the BAW North Sea model", UnTRIM User meeting, 09.05.2011, Trient, Italien.

Kösters, F., A. Plüß, M. Kastens und H. Heyer (2011): „Long-term morphodynamic modeling of the German Bight – model set-up and validation“, 5<sup>th</sup> Short Conference on Applied Coastal Research (SCACR), 07.06.2011, Aachen, Deutschland

Kösters, F. (2011):Using UnTRIM2007 in large-scale applications: the BAW North Sea model UNTRIM Users Workshop, Trient, Italien, 9. bis 11. Mai 2011

Kösters, F. and Plüß, A. (2012): Large-scale morphodynamic modeling of the German Bight – Assessing meteorological effects, PECS 2012, New York, August 2012

Kösters, F. (2012): Sediment transport in the German Bight - Numerical modeling and observational results from the AufMod project, Invited talk at PACE Workshop, Texel, Netherlands, September 2012

Kösters, F., Putzar, B., Milbradt, P., Plüß, A. (2013): Aufbau eines morphodynamischen Simulationsmodells für die Deutsche Bucht zur Abschätzung von Sedimenttransportwegen und -mengen. Vortrag: 16. Gewässermorphologisches Kolloquium, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bremerhaven, 6./7. November 2013 Veröffentlichung: Tagungsband

Kösters, F., Winter, C. (2014): Exploring German Bight coastal morphodynamics based on modelled bed shear stress. Veröffentlichung: Geo-Marine Letters (2014) 34: 21 - 36

Milbradt, P. (2013): Datenbasierte geomorphologische Hindcast-Simulationen in der Deutschen Bucht – Möglichkeiten und Grenzen, 18. KFKI-Seminar Bremerhaven, 29.10.2013

Plüß, A. und Kösters, F., (2013): Morphodynamic modelling for the entire German Bight: an initial study on model sensitivity and uncertainty, Advances in Geoscience, 1-2014, DOI: 10.5194/adgeo-1-1-2014

Valerius, J. und Kösters, F. (2012): Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht, KFKI Kolloquium, Bremerhaven, November 2012

Wosniok, C.; Valerius, J. und Lambers-Huesmann, M. (2013): Das Projekt AufMod in der Marinen Dateninfrastruktur Deutschland. In: Traub, K.-P., Kohlus, J. und Lüllwitz, T. (Hrsg.): Geoinformationen für die Küstenzone. Hamburg, 125-134. 2013.



**KLIWAS – K3** (<http://www.kliwas.de/>)

**Projekt 2.04: Betroffenheit wasserbaulicher Anlagen der deutschen Küste und der Ästuar durch Klimaänderungen;**

**Projekt 3.02: Anpassungsoptionen für Wasserstraßen und Häfen an der deutschen Küste sowie für den Küstenschutz bei Extremereignissen**

**Netzplan-Nr.:** A39550310162

**Projektleiter/in:** Dr. N. Winkel, Dr. E. Rudolph, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme II (K3)

**Bearbeiter:** Dipl.-Geol. F. Hesser, Dr. R. Seiffert, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme II (K3)

**E-Mail:** [norbert.winkel@baw.de](mailto:norbert.winkel@baw.de), [elisabeth.rudolph@baw.de](mailto:elisabeth.rudolph@baw.de)

## **1 Problemstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die deutschen Küsten und Ästuar werden in weiten Bereichen als Schifffahrtsstraßen genutzt. Die Folgen des Klimawandels können die Schifffahrt, den Zustand der Wasserstraßen und die angrenzenden Lebensräume verändern. Die möglichen Betroffenheiten werden hauptsächlich durch einen Anstieg des Meeresspiegels, veränderte Sturmtätigkeiten und ein verändertes Abflussregime beeinflusst. Die BAW erforscht in Zusammenarbeit mit den anderen drei Fachbehörden des BMVI die Folgen des Klimawandels für die Wasserstraßen und für die Schifffahrt und entwickelt Anpassungsoptionen. Ziel ist es einerseits, die Leistungsfähigkeit des Verkehrsträgers zu sichern, und andererseits, die Gewässerqualität und Lebensräume in den Flüssen und an den Küsten zu gewährleisten.

Eine Änderung des Klimas wirkt sich auf die deutschen Küsten und deren Ästuar in vielfältiger Weise aus. Wasserbaulich relevant sind hier besonders die bisher unbekanntenen Veränderungen in Wasserständen, Strömungsgeschwindigkeiten sowie dem Transportverhalten von Salz und Sediment. Die durch Klimawandel veränderte hydrologische Situation stellt eine Herausforderung dar für Betrieb, Unterhaltung und Ausbau der Seeschifffahrtsstraßen, z. B. über Zunahme der Strömungen, große unerwünschte Sedimentumlagerungen oder veränderte nautische Zugangsbedingungen zu den Häfen.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Langfristigkeit von Investitionen und Planungen im Küstenwasserbau erfordert es, Anpassungsoptionen an Klimatrends bereits heute zu entwickeln und so zu gestalten, dass ein kurzfristiges Handeln im Hinblick auf zukünftige Randbedingungen optimiert werden kann. Daher ist der erfolgreiche Verlauf des Programms für die WSV von großer Bedeutung.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel ist die Schaffung einer für Wasserstraßen und Häfen sowie den Küstenschutz optimierte Datenbasis von Klimaänderungsinformationen sowie die Entwicklung von Methoden, die das Erproben von Anpassungsmaßnahmen mit Hilfe dieser Datenbasis ermöglichen. Geplant ist die standardmäßige Einbindung von Untersuchungen unter Klimawandelbedingungen für laufende und zukünftige Projekte der WSV.

## **2 Untersuchungsmethoden**

Mithilfe dreidimensionaler hydrodynamisch-numerischer Modelle der Nord- und Ostsee, der Ästuar von Elbe, Jade-Weser und Ems sowie der Schlei werden in verschiedenen Szenarien zentrale Aspekte möglicher Zukünfte untersucht. Die Haupteinflussfaktoren Meeresspiegel, Oberwasserzufluss und Wind werden im Rahmen der durch den Klimawandel erwarteten Änderungen variiert. Mittels dieser Sensitivitätsstudien lassen sich klare Wenn-Dann Aussagen formulieren und mögliche Betroffenheiten ableiten. Im zweiten Schritt werden ausgewählte Sensitivitätsuntersuchungen in Kombination mit Anpassungsoptionen wiederholt.

### 3 Ergebnisse

Die Ergebnisse des KLIWAS-Forschungsprogramm werden 2015 als Abschlussbericht in der KLIWAS Schriftenreihe als Ausgabe 36/2014 erscheinen. Der FuE-Abschlussbericht enthält als Anlage diese Schriftenreihe und ist über EWisA abrufbar.

Zudem wurde ein KLIWAS-Bild-Atlas erstellt, in dem eine Vielzahl weiterer Ergebnisdarstellungen enthalten ist. Der Bildatlas kann ebenfalls über EWisA abgerufen werden.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2014: Dokumentation der Ergebnisse, Durchsicht durch WSV und WS14 des BMVI; Erstellung des Abschlussberichts.

Laufzeit des Vorhabens: 2009 bis 2014.

### 5 Literatur

-/-

### 6 Veröffentlichungen (Auswahl)

Holzwarth, I., Hesser, F., Schulte-Rentrop, A. (2011): Auswirkungen klimabedingter Änderungen auf das Strömungs- und Transportverhalten deutscher Nordseeästuare – ein Vergleich von Ems, Jade-Weser und Elbe. Tagungsband HTG-Kongress 07.-09.09.2011 in Würzburg.

Rudolph, E., Schulte-Rentrop, A., Schüßler, A., Johannsen A. (2012): Influence of climate change on storm surge conditions in German Estuaries and testing of probable adaptation strategies. Proceedings of 10th International Conference on Hydroinformatics - HIC 2012 Hamburg: Understanding Changing Climate and Environment and Finding Solutions; TuTech 2012.

Rudolph, E., Seiffert, A., Büscher, A., Bockelmann, A. (2013a): Protecting German North Sea Estuaries in Times of Climate Change. European Climate Change Adaptation Conference – Integrating Climate into Action, 18. März 2013, Hamburg.

Seiffert, R., Hesser F.B., Schulte-Rentrop, A., Seiß, G. (2012): Potential effects of climate change on the brackish water zone in German estuaries. Proceedings of 10th International Conference on Hydroinformatics – HIC 2012 Hamburg: Understanding Changing Climate and Environment and Finding Solutions; TuTech 2012.

Seiffert, R., Rudolph, E., Winkel, N. (2013): Investigating Impacts and Developing Adaptation Strategies on Local Scale - An Example. Impacts World 2013 Conference Proceedings. Potsdam. Potsdam Institute for Climate Impact Research, S. 580–587.

Seiffert, R. & Hesser, F. (2014): Investigating Climate Change Impacts and Adaptation Strategies in German Estuaries. Die Küste 81, S. 551-563.

## **KLIMZUG-Nord – Strategische Anpassungsansätze zum Klimawandel in der Metropolregion Hamburg)**

**Netzplan-Nr.:** A39550370163

**Projektleiter/in:** Dr. N. Winkel, Dr. E. Rudolph, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme II (K3)

**E-Mail:** norbert.winkel@baw.de, elisabeth.rudolph@baw.de

**Bearbeiter/in:** Dr.-Ing. Annette Büscher, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme II (K3)

### **1 Problemstellung und Ziel**

Die Tideelbe gehört zu den wichtigsten europäischen Schifffahrtsstraßen. Der Klimawandel wird die nautischen Verhältnisse, den Zustand der Wasserstraße und die ästuartypischen Lebensräume verändern. Die möglichen Betroffenheiten werden hauptsächlich durch einen Anstieg des Meeresspiegels, veränderte Sturmtätigkeiten und ein verändertes Abflussregime beeinflusst. Die BAW untersucht im Rahmen dieses Projektes die Folgen des Klimawandels für die Metropolregion Hamburg (MRHH) und entwickelt in Kooperation mit den Betroffenen entsprechende Anpassungsstrategien. Ziel ist es einerseits, die Leistungsfähigkeit des Verkehrsträgers zu sichern, und andererseits, die Gewässerqualität, Lebensräume und vielfältige Nutzung der Tideelbe zu gewährleisten. Das Projekt liefert Beiträge für ein „Kursbuch“, mit dem in der MRHH die Herausforderungen des Klimawandels bearbeitet werden können.

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Tideelbe ist durch ihre geographische Lage und den vorherrschenden Windrichtungen den Gezeiten, Tidenhub und der Sturmflutgefahr ausgesetzt. Sie wird daher besonders von den Folgen des Klimawandels betroffen sein, z. B. durch Anstieg des Meeresspiegels, Veränderung der Wind-, Wellen- und Niederschlagsausprägung. Die möglichen Konsequenzen gefährden das Elbeästuar zum einen durch potentielle Extremereignisse wie Sturmfluten, und zum anderen durch schleichende Veränderungen wie Verschlickung von Hafenflächen, Erosion von Wattflächen oder Salzintrusion. Um mögliche Systemantworten auf den Klimawandel abschätzen und Anpassungsoptionen für die betroffenen Sektoren zu entwickeln, wird im Projekt ein integrativer Ansatz verfolgt, der alle Interessensgruppen der Metropolregion aktiv einbezieht. Um die Bandbreite von möglichen Klimaänderungen in den Untersuchungen abzubilden, ist die Modellierung der möglichen zukünftigen Zustände als Sensitivitätsstudie angelegt. Denkbare Anpassungsmaßnahmen umfassen beispielsweise konservative Maßnahmen im Mündungsbereich oder zusätzliche Überschwemmungsgebiete.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die durch den Klimawandel veränderte hydromorphologische Entwicklung der Tideelbe ist bislang zum Großteil unbekannt. Zur langfristigen Gewährleistung der Schifffbarkeit, des Küstenschutzes und der Funktionalität des natürlichen Lebensraums ist die Abschätzung der Systemreaktion dringend erforderlich. Aufbauend auf dem im Projekt geschaffenen Verständnis können sinnvolle Anpassungsoptionen und -strategien entwickelt, auf ihre Effektivität getestet und ggf. optimiert werden. Außerdem wird ein Netzwerk aus Interessensgruppen und Expertisen aller betroffenen Sektoren aufgebaut und die WSV im Projektverlauf aktiv in den Planungs- und Entscheidungsprozess eingebunden. Der Methodenkatalog für Anpassungsoptionen und die geschaffene Infrastruktur soll die WSV bei einer nachhaltigen Gewässerbewirtschaftung unter veränderten Klimabedingungen unterstützen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Die BAW führt in KLIMZUG-NORD die Klimafolgenmodellierung für die Tideelbe durch. Es werden sowohl die Auswirkungen der Klimafolgen Szenarien auf die Tide- und Transportdynamik untersucht als auch auf dieser Grundlage Anpassungsmaßnahmen entwickelt und in ihrer Effektivität dargestellt. Die Auswahl der zu simulierenden Sensitivitätsstudien und Anpassungsmaßnahmen erfolgt in Abstimmung mit den betroffenen Teilprojekten.

## 2 Untersuchungsmethoden

Aufgrund der komplizierten Wirkungskette zwischen den globalen Klimaänderungen und den lokalen Auswirkungen sind Aussagen zu Betroffenheiten, die für Planungen genutzt werden können, mit Unsicherheiten behaftet. Daher verwendet die BAW in KLIMZUG-NORD eine Methode basierend auf Sensitivitätsstudien, s. auch Kwadijk et al. (2010). In einem hochaufgelösten 3D-hydrodynamischen Modell werden die Haupteinflussfaktoren auf die Tideelbe einzeln und in Kombination variiert und die Reaktion der Zustandsgrößen Wasserstand, Strömung, Salzgehalt, Schwebstoffgehalt an die veränderten Randbedingungen berechnet. Somit kann festgestellt werden, unter welchen Bedingungen eine mögliche Klimaänderung zu Betroffenheiten in der MRHH führen kann. Darauf aufbauend werden Anpassungsmaßnahmen entwickelt. Die Maßnahme wird untersucht, indem sie in das numerische Modell integriert und bestimmte Szenarien der Sensitivitätsstudien wiederholt werden. Ein Vergleich zwischen den Simulationen mit und ohne Anpassungsoption bildet deren Wirksamkeit ab. Die Tidekennwertanalyse deckt zudem Vor- und Nachteile der Anpassungsoption auf und ermöglicht einen Vergleich verschiedener Zustände bzw. Maßnahmen.

## 3 Ergebnisse

Im Berichtszeitraum 2014 sind aufbauend auf den erzielten Ergebnissen folgende Publikationen im Rahmen von KLIMZUG-NORD erstellt worden, s. auch: 6 Veröffentlichung: Die BAW-DH hat sich beim Klimabuch Wilhelmsburg (Schlünzen et al., 2014) mit drei Beiträgen beteiligt (Büscher et al., 2014a, b, c). Außerdem sind beim KLIMZUG-NORD Endprodukt, dem Kursbuch Klimaanpassung, zwei Kapitel mitverfasst worden (Jensen et al. 2014a, b). Des Weiteren sind die Ergebnisse des Kursbuches auf der KLIMZUG-NORD Abschlusskonferenz in einem Vortrag vorgestellt worden (Büscher et al., 2014d). Die BAW-DH hat außerdem mehrere Beiträge zur ICHE 2014 in Form von Vorträgen und Veröffentlichungen geliefert (Rudolph et al., 2014; Seiffert et al, 2014a) und schriftliche Beiträge zu Die Küste, Band 81, verfasst (Rudolph, 2014; Seiffert et al., 2014b).

## 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2014: Dokumentation der Ergebnisse und Veröffentlichungen; Erstellung des Abschlussberichts.

Laufzeit des Vorhabens: 2009 bis 08/2014

## 5 Literatur

Kwadijk, J.C.J., Haasnoot, M., Mulder, J.P.M., Hoogvliet, M.M.C., Jeuken, A.B.M., van der Krogt, R.A.A., van Oostrom, N.G.C., Schelfhout, H.A., van Velzen, E.H., van Waveren, H., de Wit, M.J.M. (2010): Using adaptation tipping points to prepare for climate change and sea level rise, a case study for in the Netherlands. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, Vol. 1, Issue 5, pp.729–740.

## 6 Veröffentlichung

Büscher, A., Paesler, A., Rudolph, E., Winkel, N. (2014a): Kapitel 3.2: Wasserstands- und Sturmflutverhältnisse der Elbe. Schlünzen, K. H., Linde, M. (Hrsg.): Wilhelmsburg im Klimawandel. Ist-Situation und mögliche Veränderungen. Berichte aus den KLIMZUG-NORD Modellgebieten, Band 4, S. 18-23, TuTech Verlag, Hamburg, ISBN: 978-3-941492-70-7.

Büscher, A., Rudolph, E. (2014b): Kapitel 4.2: Einfluss möglicher Klimaänderungen auf mittlere Tide- und Sturmflutverhältnisse. Schlünzen, K. H., Linde, M. (Hrsg.): Wilhelmsburg im Klimawandel. Ist-Situation und mögliche Veränderungen. Berichte aus den KLIMZUG-NORD Modellgebieten, Band 4, S. 50-56, TuTech Verlag, Hamburg, ISBN: 978-3-941492-70-7.

Büscher, A., Rudolph, E., Schlünzen, K. H. (2014c): Kapitel 5.2: Empfehlungen zu mittleren Wasserstandsverhältnissen und Sturmfluten. Schlünzen, K. H., Linde, M. (Hrsg.): Wilhelmsburg im Klimawandel. Ist-Situation und mögliche Veränderungen. Berichte aus den KLIMZUG-NORD Modellgebieten, Band 4, S. 69, TuTech Verlag, Hamburg, ISBN: 978-3-941492-70-7.

- Büscher, A., Jensen, F., Shaikh, S., Fröhle, P. (2014d): Hochwasserschutz an der Elbe – Ergebnisse aus dem Teilprojekt 1.3: Anpassungsbedarf an den Küstenschutz infolge klimatischer Veränderungen. KLIMZUG-NORD Abschlusskonferenz, 19.03.2014, Hamburg.
- Jensen, F., Winkel, N., Fröhle, P. (2014a): Kapitel 7: FLUSS: Klimaangepasste Ästuarentwicklung. KLIMZUG-NORD Verbund (Hrsg.) (2014): Kursbuch Klimanpassung. Handlungsoptionen für die Metropolregion Hamburg. S. 82-85, Tu-Tech-Verlag Hamburg, ISBN: 978-3-941492-66-0.
- Jensen, F., Winkel, N., Fröhle, P. (2014b): Kapitel 7.1: Küsten- und Hochwasserschutz. KLIMZUG-NORD Verbund (Hrsg.) (2014): Kursbuch Klimanpassung. Handlungsoptionen für die Metropolregion Hamburg. S. 86-89, Tu-Tech-Verlag Hamburg, ISBN: 978-3-941492-66-0.
- Rudolph, E. (2014): Storm Surges in the Elbe, Jade-Weser and Ems Estuaries. Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): Die Küste, Band 81, S. 291-300, Bundesanstalt für Wasserbau Hamburg, ISBN 978-3-939230-28-1.
- Rudolph, E., Bockelmann, A., Büscher, A., Seiffert, R. (2014): Storm Surges in German North Sea Estuaries and Climate Change – Investigating Impacts and Developing Adaptation Strategies. Lehfeldt, R., Kopmann, R. (Hrsg.): 11. International Conference on Hydroscience & Engineering "Hydro-Engineering for Environmental Challenges", 28.09.-2.10.2014, Vortrag und Proceedings, S. 291-300, Bundesanstalt für Wasserbau Hamburg, ISBN 978-3-939230-32-8.
- Seiffert, R., Büscher, A., Hesser, F. (2014a): Impact of Sea Level Rise on Estuarine Hydrodynamics. Lehfeldt, R., Kopmann, R. (Hrsg.): 11. International Conference on Hydroscience & Engineering "Hydro-Engineering for Environmental Challenges", 28.09.-2.10.2014, Vortrag und Proceedings, S. 551-563, Bundesanstalt für Wasserbau Hamburg, ISBN 978-3-939230-32-8.
- Seiffert, R., Hesser, F. (2014b): Investigating Climate Change Impacts and Adaptation Measures. Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): Die Küste, Band 81, S. 551-563, Bundesanstalt für Wasserbau Hamburg, ISBN 978-3-939230-28-1.

**Marine Dateninfrastruktur Deutschland; Vorhaben: Küsteningenieurwesen und Küstenschutz****Netzplan-Nr.:** A39550670400**Projektleiter:** Dr.-Ing. R. Lehfeldt, Dienststelle Hamburg, Geschäftsstelle KFKI**E-Mail:** rainer.lehfeldt@baw.de**1 Problemdarstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

In den letzten Jahren haben sich Standards und Technologien im Umfeld von Informationssystemen etabliert, die eine Kommunikation zwischen heterogenen und verteilten Datenhaltungen unterstützen. Dazu gehört der ISO19115-Standard für Metadaten, der ISO19119-Standard für Web-Services, die CS-W-Schnittstelle für Katalog-Dienste zur Kommunikation zwischen Metadaten-Servern und die OGC-konformen Dienste Web Mapping Service (WMS), Web Feature Service (WFS), Web Processing Service (WPS) und Web Coverage Service (WCS) für Daten aus Geoinformationssystemen. Diese Grundlagen werden in allen nationalen und internationalen Informations-Systemen angewandt. Als Beispiele seien hier die Nationale Geodateninfrastruktur GDI-DE und das Umweltportal Deutschland PortalU angeführt. Derzeit besteht noch ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um die vorhandenen und zukünftig erhobenen Küstendaten in vernetzte Informationssysteme einzubinden, sie darüber standardisiert bereitzustellen und nutzbar zu machen. Dies gilt auch für Untersuchungsszenarien mit numerischen Modellen bei der BAW.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Durch eine geeignete Vernetzung der Datenquellen wird es zukünftig möglich, in einem ökonomisch vertretbaren Aufwand umfassende Fachdaten und Informationen aus dem Küsten- und Meeresbereich für Wissenschaft, Planung, Öffentlichkeit, Politik und Verwaltung gemäß den Anforderungen bereit zu stellen. der INSPIRE-Richtlinie [EPC, 2007] und der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie [EP, 2008] umzusetzen. Die geplanten Verzeichnisse mariner Datenbestände aus unterschiedlichen Quellen realisieren auf einer einheitlichen fachlichen Datengrundlage einen standardisierten Zugang zu Fachdaten, der die Partnerdienststellen von Dienstleistungs-Routinearbeiten entlastet.

**1.3 Untersuchungsziel**

Die wesentlichen Datenquellen an der Küste aus den thematisch und sektoral ausgerichteten Aufgabenbereichen des KFKI, des Meeresschutzes, des marinen Naturschutzes, der Raumordnung sowie der Küstenforschung werden vernetzt. Dazu werden das beim BSH entwickelte GeoSeaPortal und das Nord-Ostsee-Küsten-Informationssystem NOKIS in konzeptioneller, technologischer und inhaltlicher Form zu einem übergreifenden, nationalen Meeres- und Küsteninformationssystem zusammengeführt.

**2 Untersuchungsmethoden**

Um die Anforderungen von INSPIRE zu erfüllen, sind einheitliche, grenzüberschreitende Datenmodelle erforderlich. Die verteilten Daten müssen dazu harmonisiert, durch standardisierte Metadaten beschrieben und über ebenfalls standardisierte Dienste interoperabel von den Datenerzeugern bereitgestellt werden. Das MDI-DE Portal bildet dann den gemeinsamen Einstiegspunkt zu diesen Daten und Informationen aus der deutschen Küstenzone und den angrenzenden Meeresgebieten. Es ermöglicht das Suchen nach Daten sowie deren Visualisierung und Herunterladen.

**3 Ergebnisse**

Die Ergebnisse aus dem Verbundprojekt MDI-DE werden in 14 Beiträgen zu technischen, organisatorischen und inhaltlichen Fragestellungen von Fach-Informationssystemen im Kontext der Geo-Daten-Infrastruktur Deutschland, GDI-DE, in der Zeitschrift Die Küste, 82, 2014, umfassend dargestellt.

Das Portal der MDI-DE unter <http://www.mdi-de.org>, Lehfeldt, R. und Melles, J. (2011) wurde im Juli 2012 freigeschaltet. Es wird dauerhaft beim BSH unterhalten und durch Arbeiten im Rahmen der

Verwaltungsvereinbarung zur Kooperation für Umwelt-Informations-Systeme, VKoopUIS, weiterentwickelt. Es ist als Fachportal in die GDI-DE eingebunden.

Das offene Netzwerk der MDI-DE besteht aus Bundes- und Landesbehörden, die für das Küsteningenieurwesen, den Küstengewässerschutz, den Meeresumweltschutz und den Meeresnaturschutz zuständig sind, sowie Forschungsinstituten, die auf diesen Gebieten tätig sind. Ihre technische Anbindung als Infrastrukturknoten (Bild 1) ist in einem Leitfaden [Räder et al., 2014] beschrieben. Sie betreiben die CS-W Katalogdienste zur Recherche und WMS, WFS und WPS für Darstellung, Download und Bewertung von Daten nach den Vorgaben der INSPIRE Richtlinie [Lehfeldt, R., 2013].

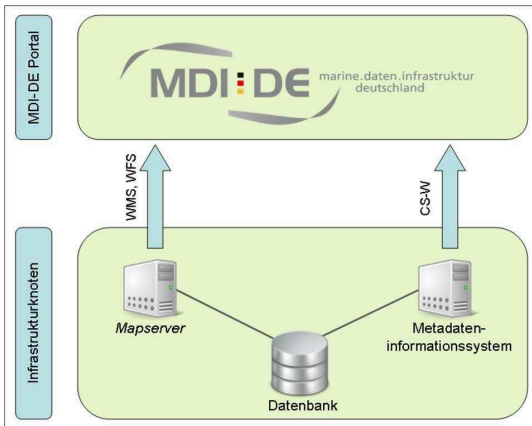


Bild 1: Infrastrukturknoten der MDI-DE stellt Metadaten und Daten über Dienste bereit

Mit den im Rahmen der MDI-DE durchgeführten Arbeiten konnten wichtige Schritte hin zu einer interoperablen Bereitstellung von Produkten aus der numerischen Modellierung in Geodateninfrastrukturen geschaffen werden, Wosniok, C. und Lehfeldt, R., (2014). Ein entsprechendes Metadatenprofil wurde entworfen und befindet sich in der Umsetzung. Mit der Umsetzung von AufMod-Produkten, (Heyer, H., Schrottke, K. (2013) in Webdienste konnten viele Elemente des Workflows so generisch angelegt werden, dass sie auf für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsprojekte genutzt werden können. Zukünftig wird die Bereitstellung von Modellierungsergebnissen (Bild 2) im netCDF-Format und die Nutzung des Web Processing Services WPS eine wichtige Rolle spielen.

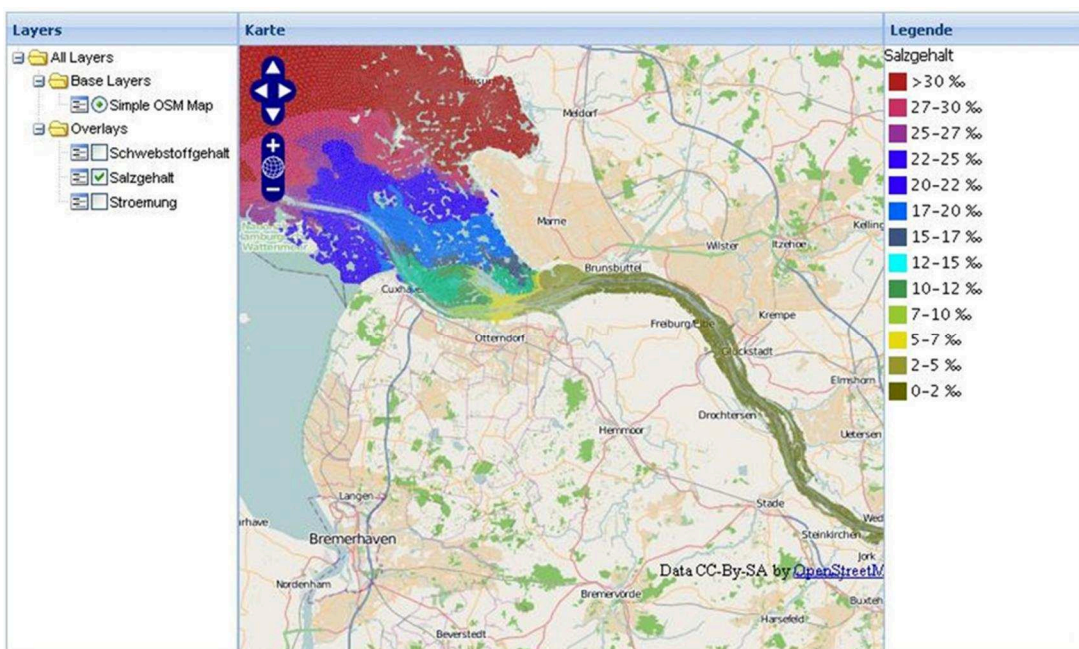
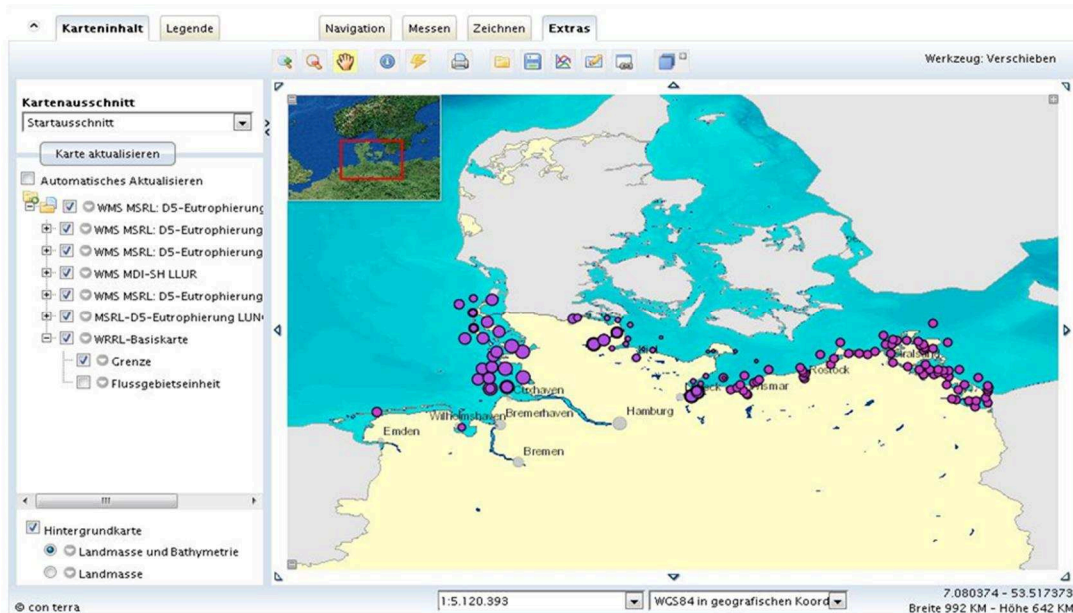


Bild 2: Salzgehaltssimulation in der Elbmündung als WMS in der MDI-DE

Im Netzwerk der MDI-DE wird die Interoperabilität, also die technischen Fähigkeit, Daten zwischen unterschiedlichen Systemen austauschen zu können, hergestellt. Für eine gemeinsame Nutzung im MDI-DE Portal werden die europäischen und nationalen Vorgaben (INSPIRE, MSRL, GDI-DE, WRRL, Natura2000) eingehalten. Die inhaltliche Harmonisierung für eine gemeinsame Nutzung der verteilt vorgehaltenen Daten wird von einer Projektarbeitsgruppe [Binder, K. et al., 2014] geleistet. Diese nimmt die erforderlichen Abstimmungsprozesse (Bild 3) mit den beteiligten Behörden wahr. Die bisher getroffenen Vereinbarungen bzw. Abbildungsvorschriften werden in Leitfäden zu den Einzelthemen wie z. B. Eutrophierung dokumentiert.



**Bild 3:** Harmonisierung von Datenbeständen der Küstenländer

Am 01.04.2014 haben die bisherigen Projektpartner eine Verwaltungsvereinbarung zum Betrieb, zur Pflege und zur Weiterentwicklung der MDI-DE (VKoopUIS Marine Daten-Infrastruktur Deutschland (MDI-DE)) geschlossen, um dauerhaft zusammenzuarbeiten und das Internetportal <http://www.mdi-de.org> zu betreiben.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2014: Erstellung des Abschlusses

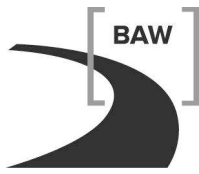
Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2014.

#### 5 Literatur

- Binder, K.; Lübker, T.; Schröder, A.; Räder, M.; Helbing, F.; Korduan, P.; Lücker, M.; X Näpfel-Löder, K.; Pramme, M.; Prange, S.; Reimers, H.-C. und Zühr, D. (2014): Prototypische Harmonisierung und Zusammenführung mariner Geodaten in einer verteilten Infrastruktur – am Beispiel der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie. Die Küste, 82.
- EUROPEAN PARLAMENT AND COUNCIL, EPC (2007): Directive 2007/2/EC establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). Official Journal of the European Union L108, pp. 1-14.
- Europäisches Parlament und der Rat der Europäischen Gemeinschaft, EP (2008): Richtlinie 2008/56/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie). Amtsblatt der Europäischen Union, L 164/19-40.



- Heyer, H., Schrottke, K. (2013): Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht - AufMod (03KIS082-03KIS088).  
doi: 10.2314/GBV:780783271
- Lehfeldt, R. (2013): Die Marine Daten-Infrastruktur Deutschland MDI-DE im Kontext von INSPIRE und GDI-DE. In: K.-P. Traub, J. Kohlus und T. Lüllwitz (Hg.): Geoinformationen für die Küstenzone: Beiträge des 4. Hamburger Symposiums zur Küstenzone. Karlsruhe: Sokrates & Freunde GmbH, S. 55–62.
- Lehfeldt, R., Melles, J. (2011): Die Marine Dateninfrastruktur Deutschland MDI-DE. In Traub, K.-P., Kohlus, J., Lüllwitz, T. (Hrsg.): Geoinformationen für die Küstenzone - Band 3. Points Verlag Norden Halmstad, pp. 107-116.
- Räder, M; Lübker, T.; Prange, S.; Binder, K.; Schacht, C.; Zühr, D. und Kohlus, J. (2014): Infrastrukturknoten für Dienste - die räumlich verteilte Komponente der MDI-DE. Die Küste, 82.
- Wosniok, C., Lehfeldt, R.(2014): Modellierung in der MDI-DE. Die Küste, 82.



## **II. Laufende FuE-Vorhaben in 2014**



## **Sicherheitskonzept für bestehende Wasserbauwerke (SiBeWa)**

**Netzplan-Nr.:** A39510070001

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. C. Kunz, Dipl.-Ing. F. Stauder, Abteilung Bautechnik

**E-Mail:** claus.kunz@baw.de, florian.stauder@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die derzeit in Deutschland gültigen Bemessungsnormen gelten für Neubauten. Die Normen basieren auf einem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept, bei dem die Streuungen von Einwirkungen (z. B. Lasten) und Widerständen (z. B. Material-Festigkeitswerte) jeweils über charakteristische Werte und dazugehörige Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt werden. Mit Hilfe der daraus resultierenden Bemessungswerte wird innerhalb von Grenzzustandsgleichungen  $E_d < R_d$  das gewünschte Sicherheitsniveau (z. B. nach DIN EN 1990) sichergestellt. Bestehende Wasserbauwerke genügen vielfach nicht mehr den aktuellen Normen, die Fortschreibungen und Erkenntniszuwächse sowie auch neue Zuverlässigkeitskonzepte enthalten. Bei bestehenden Bauwerken können gesellschaftlich adäquate Zuverlässigkeitsziele und Erkenntnisse aus qualifizierten Bestandsaufnahmen (z. B. Geometrie, Kenntnisse über das statische System, Messungen von Einwirkungen, Erkundung von Materialeigenschaften, ...) genutzt werden, um die im Normkonzept enthaltenen Unsicherheiten zu reduzieren.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die bestehenden, im Mittel rund 70 Jahre alten Wasserbauwerke der WSV (Wasser- und Schifffahrtsverwaltung) lassen sich mit Regelwerken für den Neubau schwer nachweisen, obwohl manche Bauwerke keine signifikanten Auffälligkeiten zeigen. Stilllegungen einerseits und generelle Grundinstandsetzungen andererseits strapazieren unverhältnismäßig Sachmittel- und Personalressourcen der WSV und behindern den Wasserstraßenverkehr. Ein unverhältnismäßiges Versagen von Wasserbauwerken muss dennoch ausgeschlossen sein.

Eine Nachrechnungs-Unterlage nach dem aktuellen Sicherheitskonzept, das die Erkenntnisse aus dem Betrieb und Bestand des Bauwerks (Informationen über die tatsächliche Nutzung, vorhandene Bauwerkseigenschaften, ...) angemessen berücksichtigt, soll das baurechtliche und nachweisrechnerische Defizit beseitigen, eine, ggf. auch quantitative Auskunft über die Sicherheit der Anlagen geben und zu einer Priorisierung von Instandhaltungsmaßnahmen führen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel des FuE-Vorhabens ist für bestehende Wasserbauwerke die Ermittlung eines angemessenen Sicherheitsniveaus sowie die Bestimmung von modifizierten Teilsicherheitsbeiwerten, ggf. in Abhängigkeit von Randbedingungen, so dass die in Normen verankerten übliche Nachweisformate genutzt werden können. Damit soll eine praxismgerechte, sichere und wirtschaftliche Nachweisführung von bestehenden Wasserbauwerken bei Anwendung des semi-probabilistischen Sicherheitskonzeptes ermöglicht werden und eine a.a.R.d.T. für bestehende Wasserbauwerke erstellt werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Die Untersuchung beinhaltet nach einem Literaturstudium über einschlägige Bearbeitungen die Durchführung von probabilistischen Analysen von Einwirkungen (Lasten) und Widerständen (Baustoffe), die im (Verkehrs-)Wasserbau von Bedeutung sind, mit Hilfe der Zuverlässigkeitstheorie. Weitere Methoden sind Zuverlässigkeitsberechnungen nach FORM/SORM (vereinfachte Verfahren) sowie probabilistische Berechnungen, jeweils mit einschlägiger Fachsoftware. Zur Durchführung der Zuverlässigkeitsanalysen sind Grenzzustandsfunktionen für die maßgebenden Versagensarten bei (Verkehrs-)Wasserbauwerken aufzustellen und innerhalb von Parameterstudien zu analysieren.

### 3 Ergebnisse

Aus Überlegungen wurde das Zuverlässigkeitsniveau für neue Wasserbauwerke zu  $\beta = 3,8$  über die geplante Nutzungsdauer  $T_N = 100$  Jahre identifiziert. Aus dem Sicherheitskonzept nach DIN EN 1990 lässt sich für bestehende Bauwerke ein restnutzungsdauer-orientiertes Konzept ableiten, das nach schadensfreien Jahren zu modifizierten Zuverlässigkeiten für die Restnutzungsdauern führt, vgl. Bild 1. Untersuchungen zu Modellunsicherheiten, Variationskoeffizienten und Umrechnungsbeiwerten wurden angestellt. Zum Nachweis bestehender Wasserbauwerke ist ein angepasstes Zuverlässigkeitskonzept in Arbeit, um die Besonderheiten bestehender Tragwerke innerhalb der Nachweisgleichungen berücksichtigen zu können. Auf Basis der Beziehungen in DIN EN 1990 wurden modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für einige Einwirkungen und Widerstände erarbeitet, die in Bild 2 und 3 exemplarisch abgebildet sind. Als Restnutzungsdauer gilt dabei  $T_{RN} = 30$  Jahre.

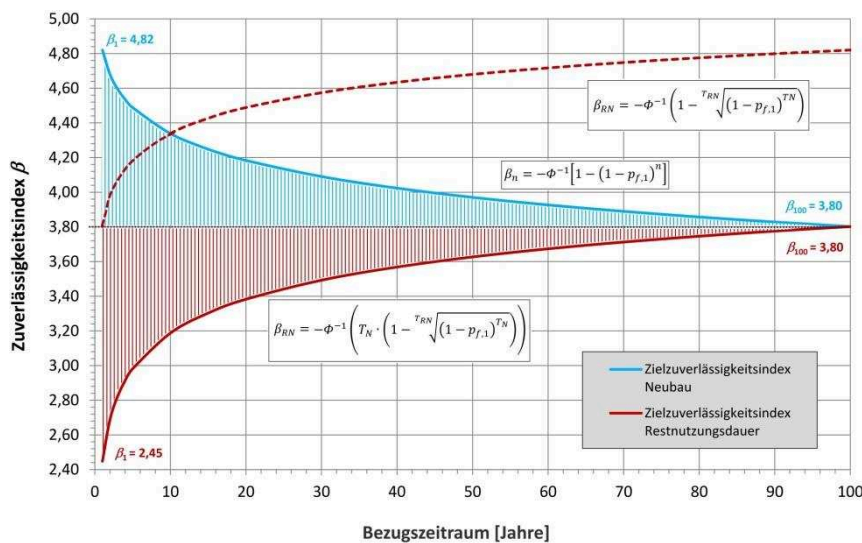


Bild 1: Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  über den Bezugszeitraum

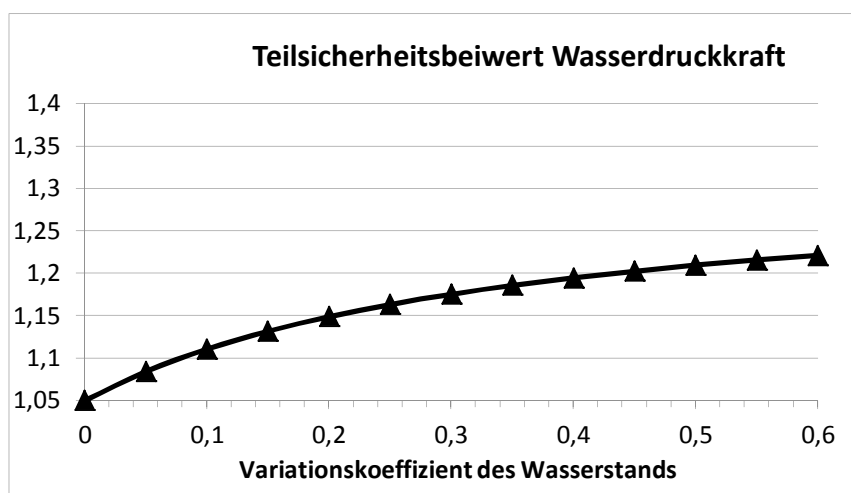


Bild 2: Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkung Wasserdruckkraft  $\gamma_Q = f(V_i)$ , für eine Restnutzungsdauer  $T_{RN} = 30$  a.

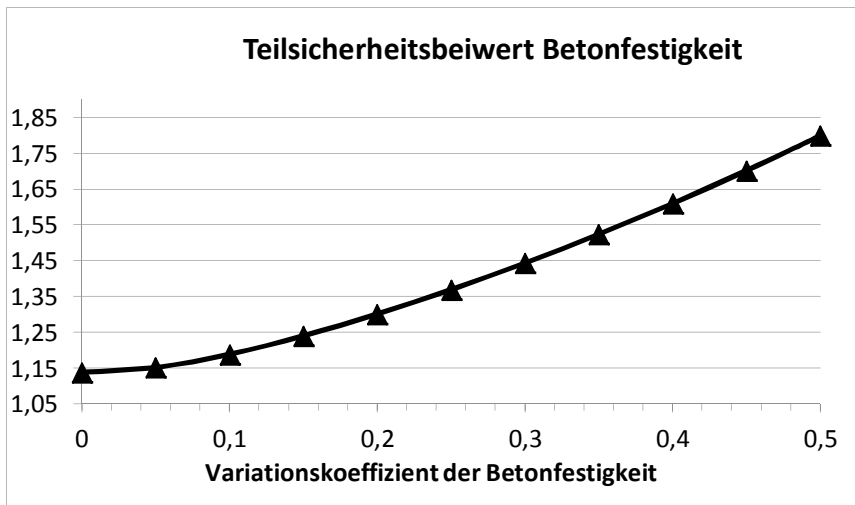


Bild 3: Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für die Betonfestigkeit  $\gamma_M = f(V_i)$ , für eine Restnutzungsdauer  $T_{RN} = 30$  a.

In einem ersten Teilbericht „Sicherheitstheoretische Studie“, BAW (2014), sind Grundlagen, Literaturübersichten, einige Konzept-Ideen für die Anpassung des Zuverlässigkeitsniveaus, probabilistische Parameterstudien an einer exemplarisch unbewehrten Gewichtsstützmauer, angepasste Teilsicherheitsbeiwerte für einige relevante Einwirkungen und Widerstände dargestellt, Ergebnisse fließen in die Bearbeitung eines BAW-Merkblatt-Entwurfs „Tragfähigkeit bestehender Wasserbauwerke (TbW)“ ein. Ergänzungen und Verallgemeinerungen der FuE-Bearbeitung sowie Praxis-Bezüge sind noch anzuschließen.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015/2016:

- Weitere Analysen zu den relevanten Einwirkungen Erddruck und Eigenlasten, Überlegungen zu einem gesellschaftlich adäquaten Zuverlässigkeitsniveau,
- Ableitung/Kalibrierung von (modifizierten) Teilsicherheitsbeiwerten nach der Zuverlässigkeitsmethode I. Ordnung (FORM/SORM),
- Vergleichsrechnungen für ausgewählte Fälle mit der (voll-)probabilistischen Methode,
- Zuverlässigkeitstheoretische Bewertung von nach früheren Normen erstellten (Verkehrs)Wasserbauwerken,
- Probabilistische Betrachtung bestehender Wasserbauwerke aus Stahlbeton,
- Anwendung des entwickelten Sicherheitskonzeptes SiBeWa für Schleusen- und Wehrbauwerke; Tastberechnungen, Berechnungen, Überprüfung und Anpassung der Modelle,

Laufzeit des Vorhabens: 09/2011 bis 12/2016.

#### 5 Literatur

-/-

#### 6 Veröffentlichungen

- Kunz, C.; Stauder, F. (2013): Sicherheitskonzept für bestehende Wasserbauwerke. In: Bautechnik-Tag 2013, Tagungsband, Hamburg, 11. bis 12.04.2013. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein.
- BAW (2014): FuE-Bericht: „Sicherheitskonzept für bestehende Wasserbauwerke – Teil 1: Sicherheitstheoretische Studie“, BAW-Nr. A39510070001-01, Dezember 2014.

**Entwicklung eines Erhaltungsmanagementsystems für die WSV (EMS-WSV)****Netzplan-Nr.:** A39510070501 (alt: A39510110139)**Projektleiter:** Dr.-Ing. J. Bödefeld, Abteilung Bautechnik,  
Projektgruppe Erhaltungsmanagement (B5)**E-Mail:** joerg.boedefeld@baw.de**1 Problemstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Kern eines Erhaltungsmanagementsystems ist die Prognose des zukünftigen Zustandes eines Bauwerksbestandes unter Berücksichtigung von Instandhaltungsmaßnahmen. Ziel ist es, den Einsatz der Maßnahmen so zu steuern, dass die Finanzmittel optimal genutzt werden.

Die ingenieurwissenschaftliche Aufgabe besteht aus der Prognose des Zustandes mit und ohne Instandsetzungsmaßnahmen sowie die vielparametrische Optimierung der möglichen Instandhaltungsszenarien.

Während für Brückenbestände internationale Systeme existieren, gibt es für Verkehrswasserbauwerke kaum komplette Verfahren (PIANC n° 129, 2013). Nach Überprüfung und Anpassung können aber unterschiedliche Elemente der Management-Systeme übernommen werden.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Altersstruktur der Verkehrswasserbauwerke in der WSV wird immer ungünstiger. Bei Schleusen sind ca. 30 % der Bauwerke schon älter als 100 Jahre, haben also ihre geplante Lebensdauer überschritten. Demgegenüber stehen begrenzte Haushaltsmittel. Um auch künftig eine ausreichende Qualität der Verkehrswege zu sichern, bedarf es eines Erhaltungsmanagementsystems, das mit Hilfe von Bauwerksinspektionen und Modellen zur Zustandsentwicklung verlässliche Vorhersagen zu Instandhaltungs- bzw. Erneuerungsmaßnahmen treffen kann und somit Finanzmittel rechtzeitig eingeplant und effizient genutzt werden können.

**1.3 Untersuchungsziel**

Das Untersuchungsziel ist durch den Titel des FuE-Verfahrens gegeben.

**2 Untersuchungsmethoden**

Die Bearbeitung zeichnet sich durch eine interdisziplinäre und WSV-weite Arbeitsweise aus (BMVI, Koordinatoren für die Bauwerksinspektion, Bauwerksprüfer und alle Fachreferate der Abteilung Bautechnik der BAW Karlsruhe). Koordiniert wird diese durch die Projektgruppe Erhaltungsmanagement der Abteilung Bautechnik in der BAW.

Die Bearbeitung erfolgt stufenweise. Die Ergebnisse müssen den Belangen der Anwender entsprechen, weshalb enger Kontakt zur WSV gesucht und jedes Zwischenergebnis mit der WSV diskutiert wird.

Grundlage aller Prognosen sind die Ergebnisse der Bauwerksinspektion. Alle eingeführten Algorithmen müssen die aus WSVPruf kommenden Daten verwenden. Prinzipiell wird versucht, den Umfang der berücksichtigten Objektarten zu erweitern.

Weiterentwicklungen werden in Kooperation mit Universitäten vorangetrieben. Für die Jahre 2013-2014 wurde mit einer FuE-Stelle in Kooperation mit der ETH Zürich die Integration von Instandsetzungsmaßnahmen in das EMS-WSV weiterentwickelt. Auf Grund des vorzeitigen Abgangs der FuE-Stelle konnten bis Ende 2014 nur Teilziele erreicht werden.

### 3 Ergebnisse

In Phase 1 der Bearbeitung für ein Erhaltungsmanagementsystem der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung wurden modular verschiedene Schwerpunkte im Bereich der Bauwerksinspektion als Grundlage erarbeitet.

Die Maßnahmen wurden im Rahmen einer Überarbeitung in die VV-WSV 2101 integriert. Ergänzend zur VV-WSV 2101 und dem Merkblatt "Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV)" wurde das Merkblatt „Bauwerksinspektion“ erarbeitet und durch das BMVBS eingeführt. Die WSV wurde umfangreich geschult.

Im Jahre 2009 war in Abstimmung mit dem BMVBS, Referat WS13, unter Zustimmung der M-Runde die Weiterentwicklung von WSVPruf im Rahmen des Konjunkturprogramms I von der FG EMS bearbeitet worden. Die Planung für die weitere Entwicklung des Erhaltungsmanagementsystems wurde entsprechend um ein Jahr in die Zukunft geschoben.

In der zweiten Phase des FuE-Projektes wurde ein Prognosemodell für die Zustandsentwicklung von Verkehrswasserbauwerken aufgestellt. Im Rahmen einer nationalen und internationalen Literatur- und Internetrecherche wurden die Zustandsprognoseverfahren von insgesamt 15 verschiedenen Managementsystemen für Infrastrukturbauwerke untersucht. Als Quintessenz zeigte sich, dass die stochastischen Verfahren Vorteile bieten. Für die Verkehrswasserbauwerke wurde ein kombiniertes Verfahren mit Überlebensfunktionen zur Prognose ungeschädigter Strukturen und Markov-Matrizen zur Prognose vorhandener Schäden entwickelt. Die erforderlichen Parameter für die Funktionen wurden im Rahmen einer Expertenbefragung nach den Grundsätzen der Delphi-Methode ermittelt.

In den Jahren 2010/2011 wurde eine umfangreiche Internet- und Literaturrecherche zu den folgenden Themen durchgeführt:

- Weitere Parameter zur Maßnahmenpriorisierung
- Instandsetzungsmaßnahmen und -kosten im Rahmen von Infrastrukturmanagementsystemen

Die Ergebnisse wurden in einem Bericht zusammengefasst und dem BMVBS im Oktober 2011 vorgelegt (Erhaltungsmanagementsystem für die WSV EMS-WSV – Meilensteinbericht 2011).

Zur Berücksichtigung weiterer Parameter wurde ein transparentes Matrix-Verfahren entwickelt. Das Risiko, das von einem Bauwerk ausgeht, wird dabei wie allgemein üblich durch das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß gebildet. Für die Eintrittswahrscheinlichkeit wird die Teilnote der Konstruktion bzw. des Stahlbaus verwendet, die direkt aus WSVPruf entnommen werden kann. Das Schadensausmaß wird auf einer fünfstufigen Skala zwischen vernachlässigbar und katastrophal eingestuft. Zur Einstufung können beliebige Kriterien wie Verkehrsbedeutung der Wasserstraße, Umfahrungsmöglichkeiten, Umwelteinfluss, wirtschaftliche Folgen, etc. berücksichtigt werden, was das Verfahren sehr flexibel macht. Die Methode wird aktuell mit dem BMVBS diskutiert.

Die Integration von Instandsetzungsmaßnahmen und –kosten bedarf weiterer Grundlagenarbeit, da in der WSV die Instandsetzungen nicht systematisch erfasst werden. In 2013 wurden im Rahmen einer Internet- und Literaturrecherche bestehende Ansätze und Vorgehensweisen zusammengetragen. Die gefundenen Verfahren lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

- Top – Down: dabei wird über den Anlagenbestand der Instandsetzungsumfang abgeschätzt;
- Bottom – Up: dabei wird der Instandsetzungsumfang über Einzelmaßnahmen an den Objekten für den Gesamtbestand hochgerechnet.

Im Rahmen einer Dissertation werden verschiedene Ansätze im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit und den Aufwand untersucht und bewertet, um zu einer optimalen Vorgehensweise für das EMS-WSV zu gelangen.

Parallel wurden Bestrebungen unternommen, charakteristische Instandsetzungsmaßnahmen, deren Kosten und den dazu erforderlichen Personalbedarf zusammen zu tragen. Dies erfolgte im Wesentli-



chen im Rahmen von Expertengesprächen mit den Fachreferaten der Abteilung Bautechnik. Mittlerweile liegt für die Kategorien Stahlbau, Korrosionsschutz und Massivbau ein Katalog mit relevanten Instandsetzungsmaßnahmen vor.

Der WSV wurde empfohlen, die Ausschreibungs- und Abrechnungssoftware als Zentralversion zu betreiben und ein vorhandenes Auswertemodul zu erwerben, um zukünftig einfacher WSV-weit zu einheitlichen Kostensätzen für Positionen des Standard-Leistungskataloges zu kommen. Übergangsweise wurden Angebotspreise von Dienststellen mit Neubautätigkeit gesammelt und ausgewertet.

Die Prognosemodelle wurde in den Jahren 2011-2013 bei zahlreichen Projekten zur Zustandsprognose von Einzelbauwerken und Bauwerksgruppen bis hin zu Wasserstraßenabschnitten verwendet, siehe beispielsweise Bild 1. Diese Anwendung dient der Verifikation und der Optimierung der gewonnenen Ansätze. Darüber hinaus wurde die Bekanntheit und die Akzeptanz in der Verwaltung gefördert.

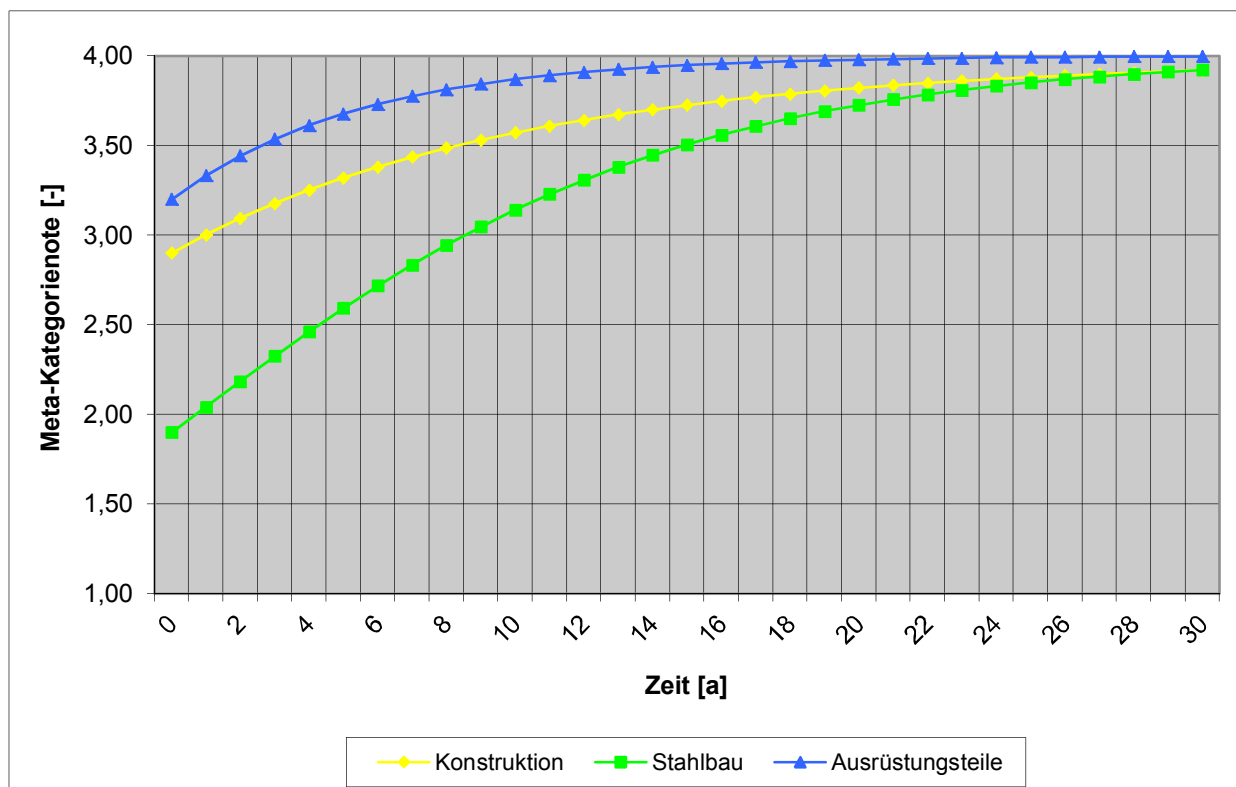


Bild 1: Prognose von drei Teilnoten auf Basis der Inspektionsergebnisse

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015:

- Untersuchungen zur Integration der Instandsetzungsmaßnahmen in Kooperation mit der ETH Zürich
- Ergänzung des Systems um Risiko- bzw. Zuverlässigkeitskennzahlen

Laufzeit des Vorhabens: 2005 bis 2015.

#### 5 Literatur

PIANC n° 129 (2013): Waterway Infrastructure Asset Maintenance Management. PIANC Report n° 129. Brüssel, 2013.

## 6 Veröffentlichungen

- Kühni, K., Bödefeld, J., Kunz, C. (2008): EMS-WSV – Ein Erhaltungsmanagementsystem für Verkehrswasserbauwerke. Bautechnik 85 (2008), Heft 8, S. 514- 520.
- Kühni, K. (2010): A Maintenance System for Waterway Infrastructures. PIANC MMX, Tagungsband, Liverpool.
- Kloé, K., Bödefeld, J. (2012): Bauwerksinspektion an Verkehrswasserbauwerken. In: Bautechnik 89 (2012), Heft 5, S. 331-332.
- Bödefeld, J., Kloé, K. (2012): Managementsystem for infrastructures at waterways. IALCCE 2012, Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Wien, 3.-6.Oktober 2012, Tagungsband

## **Ermittlung Kräfte bei Ankerwurf auf Kreuzungsbauwerke**

**Netzplan-Nr.:** A39510110178

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. (FH) H. Becker, Abteilung Bautechnik, Referat Massivbau (B1)

**E-Mail:** holger.becker@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Notsituationen in der Schifffahrt können trotz Ankerwurfverbots oftmals zum Werfen eines Ankers führen. Für Kreuzungsbauwerke unter der Wasserstraße wie z. B. Düker, Tunnel- oder Unterführungsanlagen ergibt sich hieraus ein Gefährdungspotenzial, welches im Schadensfall die Funktionsfähigkeit des Bauwerkes einschränkt (z. B. Volllaufen eines Tunnels mit Wasser) und bei Kanälen ferner zum Leerlaufen einer ganzen Kanalstrecke führen kann.

Während in der Vergangenheit eine Vielzahl von Untersuchungen zum Thema des auf dem Grund schleppenden Ankers durchgeführt wurde, sind zu Aufprallgeschwindigkeiten bzw. -kräften von Ankern keine Veröffentlichungen bekannt. Bisher erfolgte daher bei der Neuprojektierung von unterirdischen Kreuzungsbauwerken ein pauschalierter Ansatz der Auftreffgeschwindigkeit, aus welcher dann in Abhängigkeit von der Bauwerksgeometrie und weiteren Randbedingungen eine individuell geprägte statisch anzusetzende Ersatzlast ermittelt wurde. Während ein Neubau mittels der neu zu planenden Konstruktion hierauf abgestimmt werden kann, erfordert die Nachrechnung einer bestehenden Anlage einen realitätsnahen Ansatz, da hier vielfach in der Bemessung auf einen Ansatz des Lastfalles Ankerwurf verzichtet wurde und entsprechende Tragfähigkeitsreserven nur begrenzt vorhanden sind.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Eine Vielzahl von unterirdischen Kreuzungsbauwerken, besonders im Kanalnetz, wird von der WSV betrieben, bzw. ist in ihrem Besitz. Bei der Planung von Instandsetzungen an bestehenden Bauwerken wird daher die Frage nach der Sicherheit bei Ankerwurf auf das Kreuzungsbauwerk gestellt. Da diese in der Regel meistens nicht für diesen Lastfall bemessen wurden, müssen hierfür entweder Reserven in der Konstruktion aktiviert oder aufwändige Sicherungsmaßnahmen geplant werden. Zur Vermeidung einer unwirtschaftlichen Überbemessung infolge einer eventuell zu realitätsfernen Abschätzung von Ankergeschwindigkeit bzw. Aufprallkraft sind genauere Untersuchungen erforderlich.

Allerdings treten ähnliche Fragestellungen zunehmend auch im Zusammenhang mit dem Neubau von Kreuzungsbauwerken auf, bei denen die verantwortlichen Planer ebenfalls im Hinblick auf eine wirtschaftliche Bemessung nach realitätsnahen Ansätzen suchen.

Speziell sollen die Ergebnisse dieses FuE-Vorhabens für die Untersuchung der Ankerwurfsicherheit des Straßentunnels unter dem Nord-Ostsee-Kanal (NOK) angewendet werden, welcher in diesem Zusammenhang als Pilotprojekt fungiert. Um auch eine Anwendung der hieraus gewonnenen Erkenntnisse bei weiteren Kreuzungsbauwerken zu ermöglichen, werden im Anschluss daran die Untersuchungen für einen allgemein gültigen Berechnungsansatz ergänzt.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel ist die realitätsnahe Ermittlung von Ankergeschwindigkeiten beim Aufprall auf die Kanal- bzw. Flusssohle sowie die Entwicklung eines Bemessungsansatzes, welcher den Lastfall Ankerwurf genügend genau beschreibt.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Die Methoden bestehen aus in situ Messungen sowie theoretischen Ansätzen.

Bei den in situ Messungen werden an einer ausreichenden Anzahl von Schiffen Geschwindigkeitsmessungen an fallenden Ankern durchgeführt, welche sowohl für Ankergröße sowie Ankertyp des

deutschen Fluss- und Kanalnetzes bis zur Größe der auf dem NOK verkehrenden Schiffe repräsentativ sind. Hierzu wird an den Ankerspills indirekt die Geschwindigkeit der über sie ablaufenden Ankerkette mittels aufgebrachtten Magnetplättchen und elektronischem Zähler gemessen. Über eine Vergleichszählung beim Einholen des Ankers bzw. der Kette kann die korrekte Funktion des Zählwerkes überprüft werden. Vorteil der in Situ-Messung am Schiff gegenüber eines ebenfalls diskutierten Ankerwurfes von einer Einrichtung auf einem Schwimmponton ist die Berücksichtigung von Reibungseffekten von Kette (Kettenkammer, Kettenführung, Ankerklüse) und beweglichen Teilen (Ankerspill, Umlenkrolle über der Ankerklüse), welche die Geschwindigkeitsentwicklung u. U. erheblich beeinflussen.

In den theoretischen Ansätzen sollen physikalische Zusammenhänge aus der Ankerwurfgeschwindigkeit einen Bemessungsansatz liefern, welcher den dynamischen Vorgang zu einer statischen Bemessungslast vereinfacht und somit ein anwenderfreundliches Hilfsmittel zur Erfassung des komplizierten Sachverhaltes zur Verfügung stellt. Hierzu soll zunächst exemplarisch am Straßentunnel Rendsburg mittels dreidimensionaler FE-Modellierung die dynamischen Effekte untersucht werden. Evtl. unter zusätzlicher Untersuchung an weiteren FE-Modellen von Kreuzungsbauwerken erfolgt daraufhin die Entwicklung des Bemessungsansatzes. Zur Validierung der Ergebnisse aus den FEM-Berechnungen ist geplant, an einem Versuchsstand messtechnisch begleitete Ankerwurfversuche im Maßstab 1:1 durchzuführen.

### 3 Ergebnisse

Zur Erkundung der vorhandenen Ankergrößen für das Pilotprojekt Straßentunnel Rendsburg erfolgte eine statistische Auswertung der den NOK passierenden Schiffe. Hierbei wurden stichprobenartig bei rund 45 % der Schiffspassagen der Jahre 2004 bis 2006 die Ankergrößen ermittelt und somit die Verteilung der Ankergrößen bestimmt (Bild 1). Gleichzeitig erfolgte eine Auswertung der Unfallstatistik mehrerer Jahre auf dem NOK zur Ermittlung von Gefahrenzonen sowie der Unfallwahrscheinlichkeit über dem Straßentunnel Rendsburg.

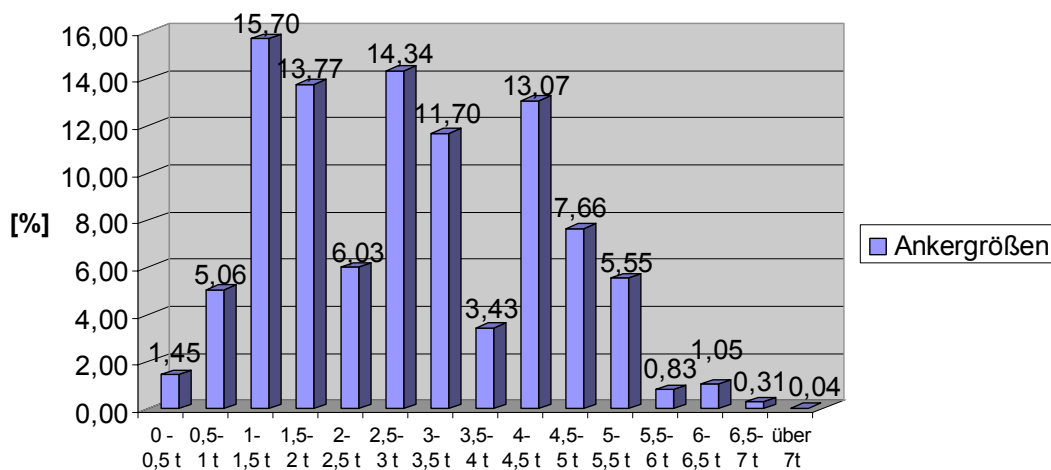


Bild 1: Verteilung der Ankergewichte auf dem NOK in den Jahren 2004 bis 2006 bei Auswertung von rund 45 % der Schiffspassagen

Des Weiteren fanden in Situ Messungen an WSV-eigenen Schiffen in der Nord- und Ostsee statt. Hierbei konnte die Geschwindigkeitsentwicklung beim Ankerwurf von Ankergrößen zwischen 1280 und 4300 kg untersucht werden. Es zeigte sich hierbei, dass, besonders bei großen Fallhöhen über Wasser, der Anker in der Luft schon eine größere Geschwindigkeit erreicht als seine spätere Grenzgeschwindigkeit im Wasser, was dann nach dem Eintauchen zu einem Abbremsvorgang auf besagte Grenzgeschwindigkeit führt. Bei den Versuchen konnte diese zwischen ca. 4,5 m/s als untere Grenze und ca. 5,5 m/s als obere Grenze bestimmt werden. Einflüsse der Ankergröße sind nach diesen Messungen als eher gering einzustufen; deutlich größeren Einfluss scheinen dabei solche aus Reibung zu haben. So konnte z. B. bei einem Schiff mit einer Führungsschiene für die Ankerkette anstelle einer Umlenkrolle die geringste Grenzgeschwindigkeit gemessen werden.

Literaturrecherchen zu artverwandten Problemen gaben Auskunft zu ähnlich gearteten Untersuchungen und Versuchsreihen mit stoßartigen, zumeist kurzzeitdynamischen Einwirkungen auf Bauwerke. Aufgrund der großen Ähnlichkeit zwischen Beanspruchung und Tragkonstruktion sei hier exemplarisch Steinschlag auf Schutzgalerien im alpenländischen Raum erwähnt, wozu in der Schweiz schon umfangreiche Untersuchungen durchgeführt wurden, welche dort in eine Richtlinie (ASTRA, 2008) zur Bemessung dieser Galeriebauten mündeten, die für eine erste Abschätzung von Lasten aus Ankerwurf herangezogen werden kann.

International sind unterschiedliche Ansätze zu Annahme oder Ermittlung von Ankergeschwindigkeiten und Ankerauftreffkräfte bekannt, exemplarisch erwähnt werden sollen z. B. die Niederlande sowie Japan. Aufgrund der Schwierigkeit, an die theoretischen bzw. versuchsgestützten Grundlagen für diese Ansätze zu gelangen und sich hierbei größere Differenzen, auch zu eigenen Ergebnissen (z. B. Ankergeschwindigkeit) ergeben, können diese im Wesentlichen nur informativ verwendet werden.

In Zusammenarbeit mit der Universität der Bundeswehr in München konnte das Eindringverhalten des für den Straßentunnel Rendsburg ermittelten Bemessungsankers an einem dreidimensionalen FEM-Modell simuliert werden. Die Simulation des Impaktvorgangs von Auftreffen bzw. Eindringen erfolgte über sogenannte Hydrocodes, bei denen für jeden Zeitschritt die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie gelöst werden und es dadurch möglich ist, hochdynamische Vorgänge im nichtlinearen Umfeld darzustellen. Über eine Sensitivitätsanalyse in Bezug auf Auftreffposition und Lage des Ankers beim Eindringen konnten unterschiedliche Gefährdungsbereiche der Tunneldecke lokalisiert und ggf. erforderliche Schutzmaßnahmen dimensioniert werden.

In einem zweiten Schritt erfolgte eine gezielte Untersuchung der soeben genannten Gefährdungsbereiche. Hierbei zeigte sich, dass starre Schutzmaßnahmen über der Sohlaufschüttung (z. B. Stahlbetonplatten) dazu führen können, dass eine „Energievernichtung“ durch Verformungsarbeit (z. B. der Aufschüttung) nur noch in deutlich geringerem Umfang stattfindet, und mehr Energie durch die Tunneldecke aufgenommen werden muss, welche somit stärker beansprucht wird. Weiche, d. h. nachgiebige Schutzmaßnahmen (z. B. Stahlplatten) sind hier effektiver und daher starren vorzuziehen. Die optimale Form der Energievernichtung ist allerdings eine verformungsfreundliche Aufschüttung, sofern die hierzu erforderliche Aufschüttungshöhe gegeben ist.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Die Erfahrungen, welche aus der projektbezogenen Aufgabenstellung beim Straßentunnel Rendsburg gesammelt wurden, sollen nun für die Bemessung von unterirdischen Kreuzungsbauwerken im deutschen Binnenwasserstraßennetz verallgemeinert und in einen anwenderfreundlichen Bemessungsansatz für Ankerwurf einfließen. Hierzu wurden schon Konstruktionen und Querschnitte typischer Kreuzungsbauwerke analysiert, welche dann in Form von FE-Modellen rechnerisch untersucht werden sollen. Ein Abgleich zwischen realer Eindringssituation und rechnerischen Randbedingungen der Modellierung mittels eines Versuchstandes wäre zwar noch wünschenswert und letztendlich auch erforderlich, kann derzeit infolge Ressourcenknappheit nicht realisiert werden. Derzeit werden sämtliche Untersuchungen und Erkenntnisse in einem Schlussbericht zusammengestellt.

Laufzeit des Vorhabens: 2007 bis 2015.

#### **5 Literatur**

ASTRA (2008): Einwirkungen infolge Steinschlags auf Schutzgalerien, Richtlinie herausgegeben vom Bundesamt für Straßen ASTRA, Abteilung Straßennetze, und SBB AG Infrastruktur Ingenieurbau, Ausgabe 2008 V2.01, Bern.

#### **6 Veröffentlichungen**

-/-

## **Ermüdungssicherheit vollverschlossener Seile**

**Netzplan-Nr.:** A39510170001

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. R. Ehmann, Dipl.-Ing. M. Schmidmeier, Abteilung Bautechnik,  
Referat Massivbau (B1)

**E-Mail:** rainer.ehmann@baw.de, michael.schmidmeier@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Seile werden im Brückenbau häufig bei Fuß- und Radwegbrücken eingesetzt, bei denen Ermüdungsbeanspruchungen keine große Bedeutung haben und vernachlässigt werden können. Durch die meist kleinen Durchmesser spielen Wechselbeanspruchungen aus Wind keine Rolle und Wechselbeanspruchungen aus Verkehr sind unbedeutend und können unberücksichtigt bleiben. Bei Großbrücken wie Hänge- und Schrägkabelbrücken werden planmäßig Dämpfungsmaßnahmen vorgesehen, die bei kleineren Straßenbrücken wie Stabbogenbrücken und Netzwerkbogenbrücken unerwünscht sind. Allerdings können bei diesen Straßenbrücken erhebliche, zur Ermüdung führende Wechselbeanspruchungen aus Verkehr und Wind auftreten. Für eine Bewertung der auftretenden Ermüdungsbeanspruchungen von vollverschlossenen Spiralseilen fehlen in den Normen derzeit die notwendigen Vorgaben wie Lastannahmen und Nachweisformate bzw. materialtechnische Kennwerte.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die im Jahr 1991 gebaute Gelmer Brücke über den DEK ist eine Stabbogenbrücke mit Rundstahlhängern. Nach nur 15 Jahren Standzeit wurden bei einer Brückenprüfung Anrisse an den geschweißten Hängeranschlüssen festgestellt, die Anlass für eine Sanierung sind. Auch eine günstigere, nach neuesten Regeln gestaltete Hängeranschlussausbildung bietet für die Zukunft keine Gewähr für ein zuverlässiges Unterbinden künftiger Schäden, da die Anrisse mit großer Wahrscheinlichkeit von einem mutwilligen Aufschaukeln (menschenginduzierte Schwingungen) herrühren, was bei einer Eigenfrequenz von 3,7 Hz leicht möglich ist. Nur durch den Einsatz von Seilen ist hier eine signifikante Anhebung der Eigenfrequenz möglich, so dass damit das Handaufschaukeln unterbunden werden kann. Hierfür fehlt jedoch – wie zuvor erläutert – der Nachweis gegen Ermüdung aus Verkehr. Die Sanierung wurde auf Wunsch der BAW verschoben, um die Versuchsergebnisse abzuwarten. Derartige Sanierungen sind auch noch bei weiteren Brückenbauwerken zu erwarten. Bei positiven Versuchsergebnissen ist künftig auch für den Neubau von Stabbogenbrücken oder Netzwerkbogenbrücken der abgesicherte Einsatz von Seilen möglich.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Erarbeiten von Nachweisformaten für den rechnerischen Nachweis der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen unter Biegung und die versuchstechnische Ermittlung einer zugehörigen Kerbgruppe für gängige Seildurchmesser wie sie für WSV-Brücken zum Einsatz kommen könnten.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Vollverschlossene Seile stellen ein insgesamt äußerst komplexes Tragwerkselement dar. Der Aufbau eines solchen Seils besteht aus einer Vielzahl an einzelnen Rund- und Formdrähten, die wendelförmig in mehreren Lagen über einem Kerndraht übereinander „geschlagen“ werden. Durch das Aufbringen von Zugkräften entstehen im Seilinneren verschiedenste Drahtbeanspruchungen (Zug, Biegung, Torsion und Querdruck). Zudem finden unter wechselnden Längs Kräften auch Relativbewegungen der Einzeldrähte untereinander statt, die zu Abrieb und Verschleiß der Drähte führen. Da eine rechnerische Abbildung dieses Tragverhaltens nach wie vor nur bedingt möglich ist, stellen Bauteilversuche die einzige Möglichkeit dar, das reale Trag- und Ermüdungsverhalten von Seilen zu beurteilen.

Vom Ingenieurbüro Dr. Schütz Ingenieure, Kempten, das die Untersuchungen auch fachwissenschaftlich betreut und auswertet, wurden dazu zwei Versuchsreihen konzipiert. Zum Einsatz kamen Seile mit verschiedenen Durchmessern von insgesamt zwei Seilherstellern. Die verwendeten Seilstärken de-

cken dabei den erforderlichen Tragfähigkeitsbereich von Hängern in „üblichen“ Bogenbrücken ab (21 bis 45 mm Durchmesser). Die Versuchsseile besitzen jeweils eine Länge von rund 5 m. Die Seile erfahren in den Versuchen eine kombinierte Wechselbelastung aus Normalkraft und Biegung unter verschiedenen Beanspruchungsniveaus und Beanspruchungsarten („statische“ und „dynamische“ Biegung, Biegung in Kombination mit veränderlicher Normalkraft, etc.).

Die erste Versuchsreihe an der TU München umfasste acht Bauteilversuche und konnte im April 2013 abgeschlossen werden. Im Rahmen der zweiten Versuchsreihe, die an der TU Braunschweig durchgeführt und im Juli 2014 beendet wurde, erfolgte eine Prüfung von insgesamt 10 Seilen. Bild 1 zeigt die beiden Versuchsstände.



*Bild 1: Versuchsstände an den MPA der TU München (links) und der TU Braunschweig (rechts)*

Im Rahmen der ersten Versuchsreihe wurde auch speziell der Seiltyp geprüft, der für die Instandsetzung des im Abschnitt 1.2 genannten Bauwerks vorgesehen ist. Die erwarteten Beanspruchungen im Seil wurden vorab an einem räumlichen Tragwerksmodell der Brücke ermittelt und daraus ein Versuchsprogramm abgeleitet.

Während aller Versuche wurden zum einen die Maschinenwerte der Versuchseinrichtung wie Zugkräfte im Seil, Wege und Kräfte zur Aufbringung der Seil- bzw. Seilkopfauslenkungen messtechnisch erfasst. Des Weiteren wurden an einer Vielzahl von Stellen die Drahtspannungen über aufgeklebte Dehnmessstreifen gemessen. Mögliche Drahtbrüche der automatisiert ablaufenden Dauerschwingversuche wurden über Schall- bzw. Beschleunigungssensoren aufgezeichnet.

### 3 Ergebnisse

Über die Versuche wurden wichtige Erkenntnisse zum Trag- und Ermüdungsverhalten von vollverschlossenen Seilen im Seilendbereich gewonnen.

So konnte zum einen die zeitliche Entwicklung von Drahtbrüchen versuchsparallel aufgezeichnet und nachvollzogen werden. Die Zuordnung der Brüche zu ihrer Lage im Seil erfolgte im Anschluss an die

Versuche durch Öffnung bzw. Zerlegung der Seile. Hierfür wurden auch zum Teil die Vergussbereiche (Seilenden) freigelegt und untersucht.

Zum anderen dienten die Dehnungsmessungen auf der Seiloberfläche dazu, das Verhalten eines zwischenzeitlich entwickelten Tragwerksmodells zu validieren und zu optimieren. Mit diesem Modell konnten Versuchsabläufe rechnerisch nachvollzogen und die Beanspruchungen in den einzelnen Drähten des Seils (auch im Seilinneren) ermittelt werden.

Aus den Versuchsergebnissen in Kombination mit den rechnerischen Untersuchungen wurde ein anschauliches Schädigungsmodell für vollverschlossene Seile unter Biegung abgeleitet. Als maßgebend für die Ermüdungssicherheit zeigt sich demnach die zwischen den Seildrähten und dem Vergussmaterial auftretende Wirkung von Reibkorrosion.

Der Bauteilversuch für die Gelmer Brücke (siehe Abschnitte 1.2 und 3) wurde in Anlehnung an die Vorgaben in DIN EN 1993-1-11 (2010) durchgeführt und konnte als bestanden beendet werden. Auf Basis dieses Ergebnisses wurde eine Zustimmung im Einzelfall für die Instandsetzung der Hänger beantragt, die auch zwischenzeitlich erteilt wurde. Die Ausschreibung und Ausführung der Maßnahme ist für 2015 vorgesehen (siehe hierzu auch (Schütz, K. G., Schmidmeier, M. (2013))).

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

In 2014 und 2015 werden die Ergebnisse der experimentellen und rechnerischen Untersuchungen abschließend zusammengestellt und aufbereitet. Der Schwerpunkt liegt dabei noch in der Ableitung eines praxistauglichen Nachweisverfahrens, mit dem planmäßig auftretende Biegung im Seilendbereich berücksichtigt werden kann.

Das Forschungsvorhaben wird 2015 abgeschlossen.

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2015.

#### **5 Literatur**

DIN EN 1993-1-11 (2010-12): Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-11: Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit Zuggliedern aus Stahl; Deutsche Fassung EN 1993-1-11:2006 + AC:2009

#### **6 Veröffentlichungen**

Schütz, K. G., Schmidmeier, M. (2013): Zur Ermüdungssicherheit von Brückenbauwerken; BAW Kolloquium 2013 „Erhalten und Ertüchtigen von Brückenbauwerken“, 04./05.11.2013, Karlsruhe



**Zwangsbeanspruchung bei dicken, gerissenen Stahlbetonquerschnitten****Netzplan-Nr.:** A39510170002**Projektleiter:** Dr.-Ing. J. Bödefeld, Abteilung Bautechnik,  
Projektgruppe Erhaltungsmanagement (B 5)**E-Mail:** joerg.boedefeld@baw.de**1 Problemstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Stahlbetonbemessung unterscheidet Last- und Zwangsbeanspruchung. Bei der Bemessung für Zwangsbeanspruchung und bei der Überlagerung von Last- und Zwangsbeanspruchung bestehen noch Wissenslücken. Auf Grund fehlender Bemessungsansätze ist die Bemessung bisher sehr pragmatisch und an Erfahrungen angelehnt. Mit der Arbeit des Projektleiters wurde für die Beanspruchung aus frühem Zwang ein mechanisch konsistentes Bemessungsmodell durch die Formulierung als Verformungsproblem erreicht Bödefeld, J. (2010), Bödefeld, J. et al. (2012). Darauf aufbauend soll nun ein Bemessungsmodell für die späte Zwangsbeanspruchung (saisonale Temperaturunterschiede, Setzungen) entwickelt werden. Dafür muss der Risszustand, mit dem das Bauwerk die Hydratationsphase beendet, bekannt sein, um darauf aufbauen zu können. Für die spätere Zwangsbeanspruchung ist dann das viskoelastische Verhalten gerissener Stahlbetonbauteile von grundlegender Bedeutung. Aussagen über das Rissbild nach der Hydratationsphase sind aus Erfahrungen an massiven Verkehrswasserbauwerken bekannt, bisher aber nicht vorhersagbar. Berechnungsmodelle funktionieren bisher nur bis zum Risszeitpunkt, und das auch nur sehr grob auf Grund fehlender Ansätze für das viskoelastische Materialverhalten. Viskoelastische Ansätze existieren bisher nur für ungerissenen Beton. Für gerissene Stahlbetonbauteile konnten keine Ansätze gefunden werden. Dabei steht besonders das viskoelastische Verhalten des Verbundes im Fokus.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Verkehrswasserbauwerke werden aktuell zum größten Teil monolithisch gebaut. Die Bewehrungsansätze sind bisher sehr konservativ und an den Erfahrungen kalibriert. Mit einem mechanisch konsistenten Bemessungsmodell kann die Wirtschaftlichkeit dieser Bauweise verbessert werden, wobei zusätzlich ein besseres Verständnis des Tragverhaltens auch die Qualität und die Dauerhaftigkeit und damit die Nachhaltigkeit des Bauwerks verbessert.

**1.3 Untersuchungsziel**

Ziel ist es, durch Versuche, Auswertung von insitu-Messungen und Berechnungen zu einem mechanisch konsistenten Bemessungsmodell für die Zwangsbeanspruchung zu kommen, das alle Phasen des Bauwerkslebens abdeckt (früher Zwang, später Zwang, Überlagerung Last).

**2 Untersuchungsmethoden**

Da bisher keine Ansätze für das viskoelastische Verhalten gerissener Stahlbetonbauteile vorliegen, müssen großformatige Versuche durchgeführt werden. Parallel soll durch nichtlineare FE-Berechnungen das Problem analysiert werden. Die Simulation der Versuche und durchgeführter insitu-Messungen sollen dann zu einem Verständnis des Tragverhaltens führen. Daraus wird dann ein Ingenieurmodell abgeleitet.

**3 Ergebnisse**

Das FuE-Projekt wurde Mitte 2011 gestartet. In der zweiten Hälfte 2011 liefen die Vorbereitungen und Beschaffungen zur Durchführung der großformatigen Versuche.

In 2012 wurden zwei Versuchsserien durchgeführt. Die erste Versuchsserie galt dabei als Tastversuch, um das Verhalten der Versuchseinrichtung sowie die verwendete Betonrezeptur zu analysieren und zu optimieren.

In der zweiten Versuchsserie wurden erste Erkenntnisse zum Verhalten der Stahlbetonbauteile gewonnen. Es werden jeweils zwei Stahlbetonbalken untersucht, einer wird zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur ausgeschalt, der zweite Balken wird bis zum Ausgleich mit der Umgebungstemperatur in Schalung und Dämmung belassen.

Es zeigt sich, dass das viskoelastische Verhalten des Körpers bis zum Risszeitpunkt sehr ausgeprägt ist und nach der Rissbildung deutlich zurückgeht. Bei der zweiten Versuchsserie wurden die Balken nachträglich mit Zwangsverformungen beaufschlagt. Der erste Balken wurde dabei bis zur Erstrissbildung beansprucht, der zweite Balken bis zum abgeschlossenen Rissbild. Auch hier zeigt sich eine sehr geringe Viskoelastizität nach der Rissbildung.

Bei der dritten Versuchsreihe, die 2013 durchgeführt wurde, sind Sollrissstellen eingefügt worden, um die Rissbildung zu steuern. Parallel sollten die Dehnungen an der Bewehrung entlang der Lasteinleitungslänge mit Hilfe von DMS erfasst werden. Es hat sich heraus gestellt, dass die Messtechnik modifiziert werden muss.

Daher wurden Kleinversuche durchgeführt und die Fehler in der Messtechnik sukzessive ausgemerzt. Parallel fanden Untersuchungen zum Einsatz von faseroptischen Messmethoden statt, die aber auf Grund der hohen Kosten und der fehlenden Erfahrungen auf diesem Einsatzgebiet verworfen wurden.

2014 wurde die vierte Versuchsreihe durchgeführt. Hier lag der Fokus auf der Rissbreitenänderung im Nutzungszeitraum. Die theoretischen Überlegungen zur Überlagerung von erhärtungsbedingten Zwangbeanspruchungen mit Einwirkungen im Nutzungszeitraum wurden vorangetrieben. Insbesondere wurde der Zwangkraftabbau infolge Rissbildung untersucht.

In 2015 ist eine weitere Versuchsreihe geplant, um den Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf den Zwangkraftaufbau im Nutzungszeitraum und die zeitliche Veränderung der Verbundeigenschaft zu untersuchen.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2015: Berechnungen, Aufstellen des Ingenieurmodells,  
2016: Auswertung, Überprüfung des Modells, Zusammenstellung

Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 2016.

#### **5 Literatur**

- Bödefeld, J.; Ehmann, R.; Schlicke, D.; Tue, N.V. (2012): Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreiten in Stahlbetonbauteilen infolge des Hydratationsprozesses – Teil 2, in: Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 2, S. 79-85
- Bödefeld, J.; Ehmann, R.; Schlicke, D.; Tue, N.V. (2012): Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreiten in Stahlbetonbauteilen infolge des Hydratationsprozesses – Teil 1, in: Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 1, S. 32 – 37
- Bödefeld, J. (2010): Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme, Mitteilungsblatt der BAW, Nr. 92, April 2010

#### **6 Veröffentlichungen**

- Tue, N. V.; Schlicke, D.; Turner, K. (2014): Zwangbeanspruchung unter Berücksichtigung der erhärtungsbedingten Spannungsgeschichte und weiteren Verformungseinwirkungen aus dem Nutzungszeitraum, in: Massivbau im Wandel - Festschrift zum 60. Geburtstag von Josef Hegger (2014), S. 451 – 462
- Turner, K.; Schlicke, D. (2014): Zwangbeanspruchungen und Rissbreitenentwicklung im Nutzungszeitraum unter Berücksichtigung der erhärtungsbedingten Spannungsgeschichte, in: Nachhaltig Bauen mit Beton: Werkstoff und Konstruktion - Beton Graz'14, S. 247 – 254

## **Bemessungskonzept für Wasserbauwerke auf Erdbeben**

**Netzplan-Nr.:** A39510170003

**Projektleiter:** Dr.-Ing. H. Fleischer, Dipl.-Ing. G. Maltidis, Abteilung Bautechnik,  
Referat Massivbau (B1)

**E-Mail:** helmut.fleischer@baw.de, georgios.maltidis@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Wasserbauwerke der WSV liegen teilweise in relevanten Erdbebenzonen wie Bild NA.1 des Nationalen Anhangs DIN-EN 1998-1/NA:2011-01 zu Eurocode 8-1 zeigt. Betroffen sind danach Gebiete entlang des Rheins und an den Unterläufen von Neckar, Mosel und Lahn.

Bei Bauwerken mit besonders hohem Schadenspotential, z. B. Stauanlagen, sind unabhängig vom EC 8 Überlegungen zu Erdbebeneinwirkungen anzustellen, siehe z. B. DIN 19700-10, wonach im Regelfall seismologische Gutachten erforderlich werden. Aus diesem Grund hat Nordrhein-Westfalen ein Merkblatt Nr. 58 zur Erdbebenbelastung von Stauanlagen herausgegeben.

Die maßgebende Norm zur Erdbebenbemessung, der Eurocode 8, besteht aus mehreren Teilen, wobei der Teil 1 sich mit den Grundlagen und den Regeln für Hochbauten beschäftigt, die weiteren Teile enthalten besondere Regelungen für Ingenieurbauwerke wie Brücken, Silos, Türme usw. Besondere Vorschriften für Wasserbauwerke, wie sie in der WSV erforderlich wären, fehlen. Auch in der z.Z. geltenden Erdbebennorm DIN 4149 (2005) für übliche Hochbauten sind keine Vorgaben für Wasserbauwerke od. ä. enthalten.

Die ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen beziehen sich bei der seismischen Analyse von Wasserbauwerken insbesondere auf die Interaktion Bauwerk-Boden und auf die Mitwirkung fließenden und stehenden Wassers bzw. Grundwassers.

Der Stand des derzeitigen Wissens spiegelt sich im EC 8 wider, wonach Besonderheiten von Wasserbauwerken nicht behandelt werden. Der Teil 5 des EC 8, EN 1998-5 (Besondere Vorschriften betreffend Gründungen, Stützbauwerke und geotechnische Aspekte) behandelt einige bei Wasserbauwerken relevanten Gesichtspunkte. In einzelnen Fällen gab es gesonderte projektspezifische Überlegungen, z. B. Kanalbrücke Magdeburg oder die Nachrechnung der Schleuse Iffezheim/Rhein auf Erdbeben. Dabei wurden Regelungen für den Hochbau nach DIN 4149 (entspricht DIN EN 1998-1) ingenieurmäßig übertragen oder es wurden mechanische Überlegungen zur Mitwirkung des Wassers ange stellt. Systematische Untersuchungen zu Wasserbauwerken liegen nicht vor.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Auch wenn nur ein Teil der WSV-Bauwerke in seismisch aktiveren Zonen (Bild 1) liegen, belegen doch Rückfragen der WSV bei der BAW die Notwendigkeit einer intensiven Beschäftigung mit diesem Thema, um künftig eine kompetente, dem Stand von Wissenschaft und Technik angepasste Vorgehensweise anbieten bzw. fachkundige Auskunft geben zu können. Wie oben dargelegt, fehlen wasserbauspezifische Regelungen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel des FuE-Vorhabens ist es, die Besonderheiten von Wasserbauwerken unter Erdbebeneinwirkungen zu erforschen, die Gefährdung von WSV-Bauwerken wie Schleusen und Wehren infolge Erdbeben grundsätzlich zu bewerten und möglichst pragmatische wasserbauspezifische Regelungen zu entwickeln. Die Regelungen sollen sich an die Grundnorm DIN EN 1998-1 anlehnen. Insbesondere werden bei dem komplexen Gesamtverhalten des Bauwerkes und dessen Interaktion mit Baugrund und Wasser ingenieurpragmatische Vereinfachungen angestrebt und die zugehörigen Grenzen der Anwendbarkeit, z. B. konstruktive Ausbildung und Geometrie des Bauwerkes, Seismizität usw. angegeben.

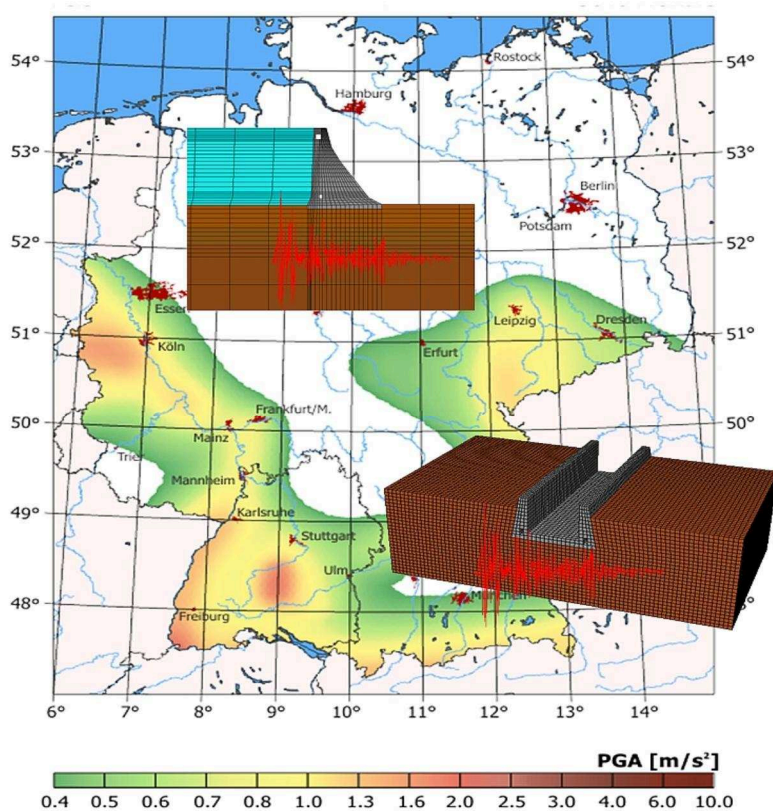


Bild 1: Seismisch aktive Zonen in Deutschland für  $T_a=2500$  (Gefährdungskarte nach GFZ Potsdam)

## 2 Untersuchungsmethoden

Neben umfänglichen Literaturrecherchen werden grundsätzliche mechanische Betrachtungen zur seismischen Analyse von Wasserbauwerken angestellt. Dabei werden typische WSV-Bauwerke aus deutschen Erdbebengebieten zu Grunde gelegt und durch Variation der Seismizität und konstruktiven Ausbildungen die maßgebenden Parameter identifiziert und deren Einfluss herausgearbeitet. Die Haupttragwerke der Anlagen (Massivbau) stehen dabei im Vordergrund.

Es sind ausschließlich numerische Untersuchungen mit leistungsstarken FE-Programmsystemen, z. B. ABAQUS, vorgesehen. Auf Laboruntersuchungen soll möglichst verzichtet werden.

## 3 Ergebnisse

Nach Abschluss der Literaturrecherche wurden die ersten Berechnungen mit ABAQUS an einem Staumauerquerschnitt durchgeführt. Anhand der Berechnungen wurde der Einfluss des umgebendem Baugrundes und besonders des anstehenden Wassers als Besonderheit bei Wasserbauwerken überprüft und der Einfluss der Erdbebenbelastung auf die Standsicherheit von Staumauern getestet. Ferner waren zur realitätsnahen Tragwerksmodellierung entsprechende Stoffgesetze zu entwickeln, mit denen die Besonderheiten der zu untersuchenden Wasserbauwerke ausreichend berücksichtigt werden (vgl. Bild 2). Die Zwischenergebnisse konnten der Fachöffentlichkeit im Rahmen von Konferenzen und Kolloquien bereits vorgestellt werden.

Die Grundlagenuntersuchungen zur Erfassung des Systems Bauwerk – Boden – Wasser konnten abgeschlossen werden. Begonnen wurde mit der Ausdehnung der Untersuchungen auf Verkehrswasserbauwerke. Hierzu wurden Kammern der Schleusen Iffezheim am Rhein (Bild 2) und Fankel an der Mosel ausgewählt und einer entsprechenden seismischen Analyse unterzogen. Von besonderer

Bedeutung sind dabei die Ergebnisse zur erdbebenbedingten Änderung der Boden- und Wasserdrücke (Bild 3)

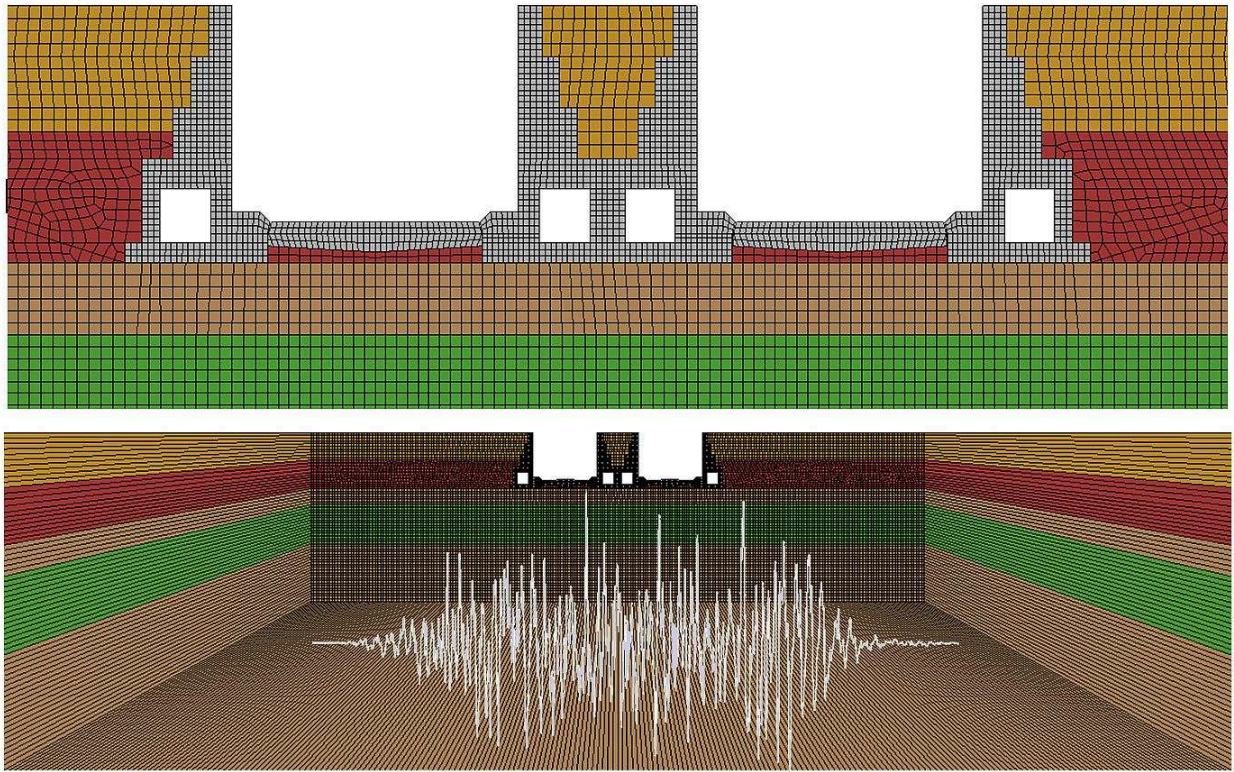


Bild 2: FEM-Modell zur seismischen Analyse der Schleuse Iffezheim

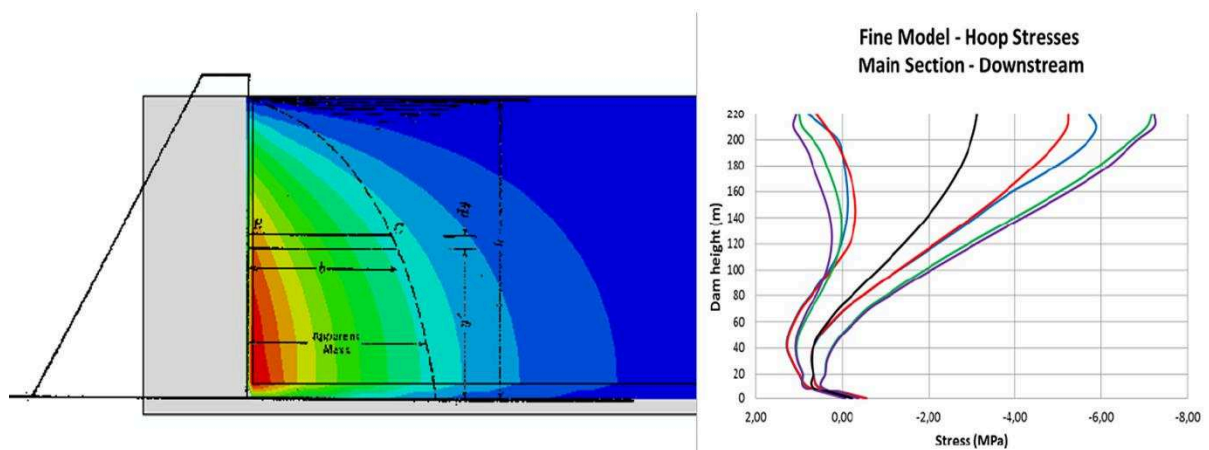


Bild 3: Erdbebeninduzierte Wasserdrücke an einer Schleusenammerwand

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015: Weitere Auswertung der durchgeführten Analysen und Verallgemeinerung der Anforderungen an Verkehrswasserbauwerken unter Erdbebenbeanspruchung sowie Abgleich mit dem geltenden Regelwerk; ggf. Formulierung von Ergänzungen; Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse mit Abschlussbericht

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2015.

## 5 Literatur

-/-

## 6 Veröffentlichungen

- Maltidis, G.; Stempniewski, L.; Fleischer, H. (2013): The influence of post-tensioned anchors to the seismic behaviour of an old masonry gravity dam, Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2013 (VEESD 2013), 28-30 August 2013, Vienna, Austria
- Maltidis G.; Stempniewski, L. (2013): Earthquake analysis of an old cyclopean concrete dam and its seismic retrofit with post-tensioning anchors, 9th ICOLD European Club Symposium, Venice, 10-12 April 2013 (Template Poster)
- Maltidis, G.; Stempniewski, L. (2013): Fluid Structure Interaction: Arch Dam - Reservoir at Seismic Loading, 12th International Benchmark Workshop On Numerical Analysis Of Dams, 2-4 October 2013, Graz, Austria.
- Maltidis, G. (2013): Earthquake analysis of an old cyclopean concrete dam and its seismic retrofit with post-tensioning anchors, 2. Griechische Konferenz für Talsperren und Stauseen, 7-8 November 2013, Athens, Greece. In Griechisch.
- Maltidis, G.; Stempniewski, L. (2012): Erdbebenbeanspruchung für Verkehrswasserbauwerke, Eurocodes für den Verkehrswasserbau – Bundesanstalt für Wasserbau, 8 Oktober 2012, Karlsruhe, Deutschland.

## **Entwicklung eines Verkehrslastmodells für typische Brücken der WSV**

**Netzplan-Nr.:** A39510170004

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. H. Becker, Dipl.-Ing. R. Ehmann, Abteilung Bautechnik,  
Referat Massivbau (B1)

**E-Mail:** holger.becker@baw.de, rainer.ehmann@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Mit der Einführung der DIN-Fachberichte für den Brückenbau wurden die bisherigen unterschiedlichen Brückenklassen für Straßenverkehr zugunsten eines einheitlichen Verkehrslastmodells aufgegeben, welches unabhängig von Straßenkategorie bzw. den Einwirkungsverhältnissen ist. In der Nachrechnungsrichtlinie für bestehende Straßenbrücken ist die Möglichkeit vorgesehen, in Abhängigkeit des täglichen Schwerverkehrs (DTV-SV) und der Art des Verkehrs (Ortsverkehr, Regionalverkehr oder Fernverkehr) bei bestehenden Straßenbrücken ein reduziertes Ziellastniveau in Anlehnung an die früheren Brückenklassen 60/30, 60/0 oder 30/30 zu bestimmen. Bei vielen schwach frequentierten WSV-Brücken würde die formale Anwendung dieser Richtlinie zu ungerechtfertigten Tragfähigkeitsdefiziten führen, da das Ziellastniveau höher als die Brückenklasse ist.

Die in der Nachrechnungsrichtlinie formulierte Methodik zur Bestimmung des Ziellastniveaus beruht auf Verkehrsmessungen an 3 verschiedenen Autobahnbrücken. Eine Übertragung auf untergeordnete Straßen und auf Brücken mit 2-spurigem Verkehrsquerschnitt ist unter diesen Voraussetzungen zu hinterfragen

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die WSV besitzt eine Vielzahl von Brücken alter Brückenklassen im untergeordneten Verkehrsnetz (mit und ohne Verkehrsbeschränkung), welche einer Nachrechnung gemäß der Nachrechnungsrichtlinie mit dem dort formulierten Ziellastniveau nicht standhalten und in weiterer Konsequenz durch einen Neubau ersetzt werden müssten. Aufgrund der vergleichsweise schwachen Frequentierung dieser oftmals als Wirtschaftswegbrücke oder im Ortsverkehr genutzten Bauwerke liegt die Vermutung nahe, dass der aktuell vorhandene und auch in Zukunft zu erwartende Verkehr mit den heute geltenden Lastmodellen überschätzt wird und viele der betroffenen Bauwerke nach wie vor ausreichend dimensioniert sind.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Untersuchungsziel ist, für die Straßenbrücken der WSV zutreffende Verkehrslastmodelle in Anlehnung an die aktuell für Neubau gültigen Belastungsmodelle nach Eurocode DIN EN 1991-2 bzw. nach alter Norm DIN 1072 zu ermitteln.

Durch Nachrechnungen bestehender, über 100 Jahre alter Brücken sowie durch die Zielsetzung des BMVI, die Nachrechnungsrichtlinie im ersten Schritt für Brücken im Zuge von Bundesstraßen einzuführen, wurde das Untersuchungsziel weiter präzisiert und den Anforderungen der WSV angepasst.

In die Betrachtungen einbezogen werden sollen sowohl bestehende Brücken (analog der Nachrechnungsrichtlinie) als auch eventuell abweichende Verkehrslastmodelle für Neubauten.

Bei den zu entwickelnden Verkehrslastmodellen ist wiederum zu unterscheiden zwischen dem Lastmodell für statische Nachweise (früher Brückenklasse genannt) und dem zugehörigen Ermüdungslastmodell.

### **2 Untersuchungsmethoden**

An ausgewählten Brücken der WSV werden die durch den laufenden Verkehr ausgelösten Bauwerksreaktionen gemessen. Gleichzeitig ist vorgesehen, den vorhandenen Verkehr in Menge, Fahrzeugart und Abstände der passierenden Fahrzeuge zu erfassen. Die Erstellung einer aussagekräftigen Mess-

konzeption erfolgt durch eine realitätsnahe Tragwerksmodellierung und Belastung mit entsprechenden Verkehrsszenarien. Eine Kalibrierung der rechnerischen Bauwerksreaktionen (Dehnungen, Verdrehungen usw.) erfolgt durch Vergleich mit gemessenen, die bei Überfahrten mit vermessenen und gewogenen Fahrzeugen in unterschiedlichen Konstellationen gewonnen werden. Das Messprogramm berücksichtigt die vorhandene messtechnische Ausstattung sowie die Verhältnisse und Möglichkeiten an der Brücke. Die Messdauer beträgt ca. 3 Monate bis zu einem Jahr, angepasst an das Brückenobjekt und den zugehörigen Randbedingungen. Die Messwerte der hochfrequenten Messungen sind entsprechend aufzubereiten und auszuwerten. Sofern messtechnisch erfasst, wird eine Verbindung zur zugehörigen Verkehrskonstellation hergestellt.

Die Messungen spiegeln das momentane zufällige Belastungsbild der Brücke wider. Ausgehend von der gemessenen Verkehrscharakteristik können durch statistische Betrachtungen und durch Simulationen andere Verkehrsszenarien und Verkehrszusammensetzungen berücksichtigt und deren Auswirkungen analysiert werden. Daraus wird dann ein angenähertes, auf der sicheren Seite liegendes Verkehrslastmodell entwickelt, welches alle Beanspruchungsarten (z. B. Querkraft, Biegemoment) und Bauteile (z. B. Längsträger, Fahrbahnplatte, Hänger usw.) gleichermaßen abdeckt.

### 3 Ergebnisse

Das FuE- Projekt wurde Mitte 2013 gestartet. Dazu wurden Forschungs Kooperationen mit den Ingenieurbüros Prof. Dr. U. Freundt und Dr. Schütz Ingenieure eingegangen. Fünf Brücken der WSV wurden bisher als geeignete Untersuchungsobjekte ausgewählt:

1. Die Drucksbrücke überführt eine mit Schwerverkehr hoch belastete Landesstraße über den Dortmund-Ems-Kanal. Es handelt sich um eine stählerne Stabbogenbrücke mit einer Spannbeton-Fahrbahnplatte, bemessen für Brückenklasse 60/30. Im Zuge einer gutachtlichen Bearbeitung zur Ermüdungsgefährdung war eine Messeinrichtung für Dauermessungen installiert. Diese Messanlage wurde im September 2013 erweitert zur Erfassung der Verkehrsbelastung an maßgebenden Bauwerksteilen im Hinblick auf die Tragfähigkeit. Fertiggestellt sind die Auswertungen zur Ermüdungssicherheit. Durch eine Rainflow-Auszählung gemessener Spannungsschwingspiele aus Verkehr wurde an relevanten Kerbstellen die aufgetretene Schädigung ermittelt und auf eine Nutzungsdauer von 100 Jahren hochgerechnet. Es konnte dabei nachgewiesen werden, dass die Ermüdungssicherheit gut eingehalten ist und zum normativen Ermüdungslastmodell 3 ein Wichtungsfaktor von 0,54 angesetzt werden kann. Die Auswertungen zur Tragfähigkeit stehen noch aus.
2. Die Dreierwalder Brücke bei Rheine kreuzt ebenfalls den DEK und überführt dabei eine Kreisstraße. Die 55m weit gespannte Stabbogenbrücke mit orthotroper Fahrbahnplatte wurde für die Tragfähigkeit einer Brückenklasse 30 bemessen, das Ziellastniveau gemäß Nachrechnungsrichtlinie soll BK 60 sein. Die Messeinrichtung wurde im März 2014 installiert und war dann über 4 Monate lang in Betrieb. Dabei wurden die Anzahl der Fahrzeuge, Anzahl, Abstand und Gewichte der Achsen sowie Geschwindigkeiten und Fahrzeugabstände gemessen. Die statistische Auswertung der Messdaten ist erfolgt, ebenfalls Simulationsrechnungen zur Tragfähigkeit und zur Ermüdung. Die endgültigen Ergebnisse liegen Anfang 2015 vor.
3. Bei der Stadtbrücke Riedenburg musste wegen Anrissen bei den Hängern eine Messeinrichtung zur Erfassung der Schädigung aus Wind und Verkehr installiert werden. Diese Messeinrichtung wurde analog der Drucksbrücke erweitert, um Angaben zur Tragfähigkeit und zur Ermüdungssicherheit des Gesamttragwerkes zu erhalten. Ergebnisse stehen noch aus.
4. Durch die WSV veranlasste Nachrechnungen an über 100 Jahre alten Brücken über den Stichkanal Linden ergaben erhebliche rechnerische Ermüdungsdefizite bei Ansatz des normativen Ermüdungslastmodelles 3. Zum Nachweis einer tatsächlich vorhandenen Ermüdungssicherheit und zur Erfassung der Belastungen für die Tragfähigkeit wurde im Oktober 2014 an der Brücke „Göxer Landstraße“ eine Messeinrichtung analog zur Dreierwalder Brücke installiert und ist seither in Betrieb.



5. Die nur für eine Brückenklasse 12/0 bemessene einspurige Brücke Herbrum überführt einen Wirtschaftsweg, welcher vermutlich von Fahrzeugen des Schwerverkehrs nur wenig frequentiert wird. Über eine Messanlage soll die Beanspruchung der Brücke mittels Langzeitmessung erfasst werden, um auch saisonalen Verkehr zu erfassen. Die teilweise schon Ende 2014 installierte Anlage wird Anfang 2015 ergänzt.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2015: Fertigstellung der Simulationen zur Dreierwalder Brücke. Fortführung der Messungen mit Auswertungen bei den anderen 4 Brücken. Installation einer Messeinrichtung an der Lingener Dammbücke, einer Brücke über den DEK im Zuge einer Bundesstraße.

2016: Weitere Auswertungen und Aufnahme von Messungen an einer weiteren Brücke.

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2016.

#### **5 Literatur**

-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

Freundt, U.; Böning, S.; Hölzer, D. (2014): Messwertgestützte Ermittlungen von Verkehrslastmodellen für typische Brücken der WSV. BAW-Kolloquium 23. und 24. September 2014 in Karlsruhe.

## **Entwicklung eines Ingenieurmodells zur Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit schubunbewehrter Stahlbetonquerschnitte bestehender Wasserbauwerke**

**Netzplan-Nr.:** A39510170005

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. M. Lutz, Bautechnik, Abteilung Bautechnik, Referat Massivbau (B1)

**E-Mail:** matthias.lutz@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

Im Rahmen der Nachrechnung von bestehenden Wasserbauwerken aus Stahlbeton muss immer wieder festgestellt werden, dass die Nachweisformate der geltenden Regelwerke (DIN 1045-1, DIN EN 1992-1-1 EC 2) hinsichtlich der Querkrafttragfähigkeit nicht erfüllt werden. Wegen unterschiedlicher Bemessungsmodelle weisen die Stahlbetonbauwerke, die auf Grundlage älterer Regelwerke bemessen wurden, im Allgemeinen nicht die erforderliche Querkraftbewehrung und damit die rechnerische Tragfähigkeit auf, die nach derzeit geltenden Normen vorliegen müsste. Ferner bleiben die Besonderheiten massiver Wasserbauwerke (z. B. Abmessung, Beanspruchung, System), die im Allgemeinen einen günstigen Einfluss auf die Querkrafttragfähigkeit haben, auch in aktuellen Bemessungsregeln unberücksichtigt.

Ziel ist es, ein praxisgerechtes Ingenieurmodell zur Abschätzung der Querkrafttragfähigkeit von WSV-Bestandsbauwerken zu erarbeiten, um diese unter Berücksichtigung ihrer wasserbauspezifischen Besonderheiten im Rahmen einer Nachrechnungsrichtlinie besser bewerten zu können

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Regelungen zur Querkraftbemessung von Stahlbetonquerschnitten haben sich im Laufe der Zeit mehrfach geändert. Obwohl der WSV zur Zeit keine Bauwerksschäden bekannt sind, die nachweislich auf Querkraftversagen zurückzuführen sind, weisen bestehende Bauwerke oftmals große Standsicherheitsdefizite auf. Das Bemessungsmodell für die Querkraft in der derzeit geltenden Massivbaunorm EC 2 ist ein halbempirisches Modell. Die Hauptparameter des Modells wurden durch Auswertung von Versuchen kalibriert, die vorwiegend mit Einzellasten und großen Schubschlankheiten durchgeführt wurden. Die tatsächliche Querkrafttragfähigkeit der meist dicken, plattenartig beanspruchten Wasserbauwerke wird oftmals unterschätzt. Nach ersten Voruntersuchungen von Prof. Tue ist die Querkrafttragfähigkeit wesentlich von dem Spannungsverhältnis im Schubfeld abhängig. Es konnte bewiesen werden, dass die Querkrafttragfähigkeit bei Bauteilen mit Gleichstreckenlast unter sonst gleichen Randbedingungen deutlich höher als bei Bauteilen mit Einzellasten ist. Ursache hierfür ist die günstigere Momenten-Querkraft-Kombination im Schubfeld bei Gleichstreckenlast, so dass die Fortpflanzung der geneigten Risse im Schubfeld erst bei höheren Beanspruchungen stattfindet. Weiterhin spielt die Schubschlankheit eine große Bedeutung. Bei geringer Schubschlankheit kann sich der fachwerkartige Kraftfluss nach Erreichen der sog. Schräggrisslast in ein Sprengwerk umlagern, so dass die aufnehmbare Last weiter gesteigert werden kann, während dies bei großer Schubschlankheit nicht möglich ist.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Ein Großteil der WSV-eigenen Wasserbauwerke wurde auf Grundlage älterer Normen erstellt. Bei Nachrechnungen im Rahmen von Umbaumaßnahmen, Zustandsbewertungen oder der Neuerstellung statischer Berechnungen nach den schärferen, neuen Regeln weisen diese Ingenieurbauwerke oft rechnerische Defizite in der Querkrafttragfähigkeit auf, auch wenn sich die Bauwerke augenscheinlich in einem guten Zustand befinden. Wirksame Querkraftverstärkungen sind meist extrem aufwändig, greifen stark in die Bausubstanz ein oder aus konstruktiven Gründen überhaupt nicht möglich.

Mit Hilfe einer Bemessungsregel, die die wasserbauspezifischen Besonderheiten auf Grundlage der neueren Erkenntnisse realitätsnah berücksichtigt, könnte das Sicherheitsniveau bestehender Bauwerke besser eingeschätzt, Verstärkungsmaßnahmen besser dosiert bzw. unnötige Verstärkungen oder Stilllegungen vermieden werden. Sie soll in das BAW-Merkblatt zur Untersuchung der Tragfähigkeit bestehender Wasserbauwerke eingebunden werden.

### 1.3 Untersuchungsziel

Erstellung eines praxismgerechten Ingenieurmodells zur Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit schubunbewehrter Bauteile unter Berücksichtigung ihrer wasserbauspezifischen Besonderheiten. Einbindung in das BAW-Merkblatt „Tragfähigkeit bestehender Wasserbauwerke“

### 2 Untersuchungsmethoden

Die Bewältigung dieser Forschungsaufgabe erfolgt in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Nguyen Viet Tue vom Institut für Betonbau der Technischen Universität Graz. Neben umfangreichen Literaturrecherchen werden grundsätzliche Parameter massiver Wasserbauwerke herausgearbeitet und beschrieben. In nichtlinearen FE-Simulationen werden grundsätzliche Erkenntnisse zum Tragverhalten gewonnen sowie eine Nachrechnung ausgewählter Versuchsergebnisse der Schubdatenbank durchgeführt. Sie dient ferner zur Ermittlung wesentlicher Versagenskriterien.

Auf Grundlage der Erkenntnisse wird ein Ingenieurmodell für die Nachrechnung schubunbewehrter bzw. gering schubbewehrter Wasserbauwerke erstellt. Zur Verifizierung sind zusätzliche Versuche durchzuführen. Das Ingenieurmodell wird durch die Anwendung an einem ausgewählten Wasserbauwerk auf seine Anwenderfreundlichkeit geprüft.

### 3 Ergebnisse

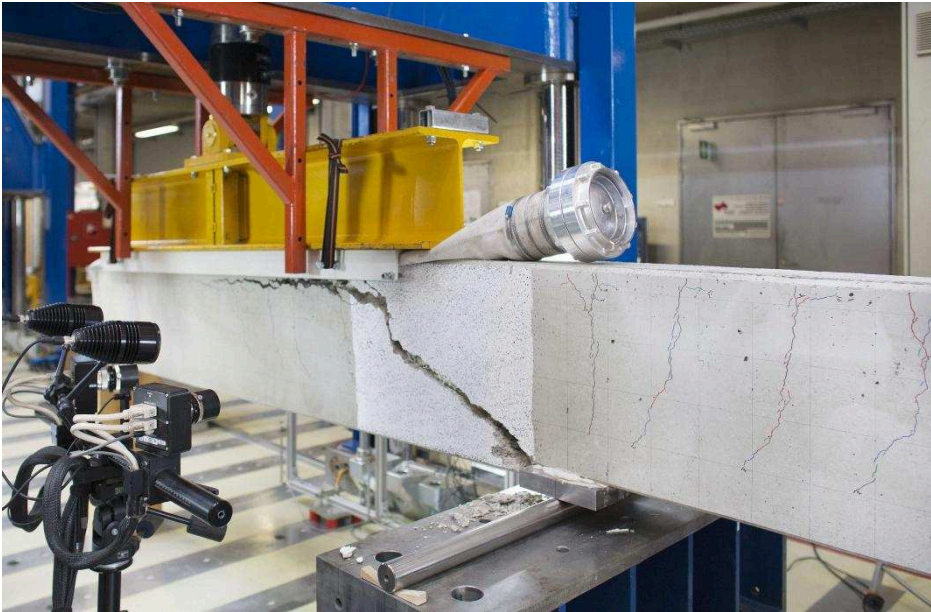
In einem ersten Bericht vom Juli 2013 wurde ein allgemeiner Überblick über den Stand der Technik durch Analyse der derzeit vorhandenen wesentlichen Querkraftmodelle sowie der Bemessungsmodelle nach internationalen Normen erarbeitet und diskutiert. Es wurden deren resultierende Querkrafttragfähigkeiten verglichen und experimentell ermittelten Werten von Schubversuchen gegenübergestellt.

Weiter erfolgte ein Vergleich von Versagenszeitpunkten bei FEM-Berechnungen mit den Schubtragfähigkeiten nach Norm. Hier fällt auf, dass die Werte bei Ansatz von Einzellasten akzeptable Übereinstimmungen aufweisen, während das Lastniveau bei Gleichstreckenlast der FEM-Untersuchungen eine mehrfach höhere Schubtragfähigkeit aufweist.

Bei der aktuellen Entwicklung eines neuen Ingenieurmodells wird als Kriterium für die Begrenzung der Schubtragfähigkeit die Bildung eines kritischen Schubrisses definiert und Kriterien zu dessen Bestimmung vorgestellt (zweiter Bericht vom Dezember 2013). Analysiert wird das Spannungsverhältnis im gesamten Schubfeld unter Berücksichtigung der vorhandenen Biegerisse. Der Mechanismus des Querkraftversagens, die Bestimmung der kritischen Stelle des Versagens in Abhängigkeit der vorhandenen (Biege- und Querkraft-) Beanspruchungen sowie die Querkrafttragfähigkeit werden für unterschiedliche Systeme und Belastungen betrachtet. Die rechnerisch ermittelten Querkrafttragfähigkeiten des neuen Modells werden mit Ergebnissen der Ansätze aus aktuellen Regelwerken und mit den Werten aus Schubversuchen verglichen.

Zur Bestätigung und weiteren Verbesserung der Modellvorstellungen wurden im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der TU Graz experimentelle Querkraftversuche geplant und in zwei Versuchsreihen durchgeführt. Ein wesentlicher Punkt war die Betrachtung des Einflusses der Biegebeanspruchung auf das Querkraftverhalten an unterschiedlichen Schubfeldtypen. Während bereits eine Vielzahl von Versuchsergebnissen an Einfeldträgern unter punktförmiger Belastung vorliegt, besteht die Besonderheit der aktuellen Versuche darin, dass auch gezielt das Tragverhalten von Einfeld- bzw. Kragträgern unter Streckenlast ermittelt wurde. Die versuchstechnisch schwierig aufzubringende Gleichstreckenlast wurde mit einem wassergefüllten Feuerwehrschauch erzeugt. Zur Auswertung wurden neben Standardverfahren auch ein optisches 3D-Verfahren herangezogen.

Ersten Vergleichen zufolge kann sowohl die Querkrafttragfähigkeit als auch die Versagensstelle in den untersuchten Balken durch den neuen Modellansatz gut beschrieben werden.



*Bild 1: Versuchsaufbau Kragträger unter Gleichstreckenlast nach Querkraftversagen*

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

- 2015 Anwendung des Ingenieurmodells und Prüfung an einem ausgewählten Wasserbauwerk auf seine Anwenderfreundlichkeit,  
2015 / 2016 Einbindung der Erkenntnisse in eine Bemessungsregel zur Nachrechnung der älteren Wasserbauwerke, Anpassung von Sicherheitsbeiwerten und Materialparameter, Formulierung konstruktiver Randbedingungen

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2016.

#### **5 Literatur**

-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

Tue, N. V., Theiler, W., Tung, N.D. (2014): Schubverhalten von Biegebauteilen ohne Querkraftbewehrung, Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014), Heft 10.

## **Korrosionsschutz von Stahl in Beton - Untersuchungen zum Kathodenschutz der Straßenbrücke B500 über den Rhein bei Iffezheim**

**Netzplan-Nr.:** A39510270002

**Projektleiter:** Dr. G. Binder, R. Baier, Abteilung Bautechnik,  
Referat Stahlbau, Korrosionsschutz (B2)  
Ch. Tritschler, WSA Freiburg

**E-Mail:** guenter.binder@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die BAW hat den elektrochemischen Schutz der Stahlwasserbauwerke und Uferbefestigungen (Stahlspundwände) an den bundesdeutschen Wasserstraßen seit Jahrzehnten unterstützt und vorangetrieben. Das Grundprinzip hierbei ist die Einspeisung von Gleichstrom in das zu schützende Stahlbauteil zwecks Absenkung des elektrochemischen Potentials. Dieses Verfahren - Kathodischer Korrosionsschutz (KKS) - wird derzeit an der Straßenbrücke Iffezheim auch für Stahl in Beton angewandt. Die Elektrochemische Schutzmethode KKS-B wurde an der oben genannten Straßenbrücke zunächst erprobt, wobei die Umsetzung zum Jahreswechsel 2010/2011 erfolgte. Über einen Teilbereich der Brücke wurde der südliche Hohlkasten mit 2.050 Einzelanoden (im Unterschied zum gängigen Streckmetallgitter) in sechs Schutzbereichen ausgerüstet und über diese der notwendige Schutzstrom möglichst gleichmäßig eingespeist. Ein weiterer Teilbereich eines Hohlkastens der Brücke wird dabei mit einem gängigen flexiblen Streckmetallgitter aus MMO-aktiviertem Titannetz als flächige Fremdstromanode versehen. Mit variabler elektrischer Spannung, unter Verfolgung des Schutzstrombedarfs, kann man derartige Schutzstromanlagen entsprechend den Anforderungen auslegen und steuern. Gleichzeitig kann jeder Schritt durch ebenfalls eingebettete Mess- bzw. Bezugs Elektroden kontrolliert werden. Diese so genannte Potentialfeldmessung ist übrigens dem Verfahren ähnlich, mit dem bereits im Vorfeld die Schädigung der Bewehrung detektiert worden ist.

Neben dem großen Vorteil der ständigen Überwachung des Sanierungserfolgs (Absenkung des Korrosionsstromes gegen Null), diffundiert das schädliche Chlorid (Salz) durch das angelegte elektrische Feld von der Bewehrung weg, wodurch man sich schließlich eine aufwändige Betonsanierung in weiten Bereichen des Hohlkastens erspart. Die Möglichkeit eines Monitorings besteht in der Verfolgung der zeitlichen Entwicklung der Korrosionssituation durch eine Potentialfeldmessung mit  $MnO_2$ -Bezugs Elektroden (mit alkalischer Gelfüllung). Dieses Verfahren wiederum ist von einer Reihe von variablen Parametern abhängig und teilweise schwierig zu interpretieren.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) besitzt eine große Anzahl von Stahlbetonbrücken, u. a. auch so genannte direkt befahrene Brücken, die häufig durch Chlorideinwirkung und die dadurch erfolgte Depassivierung an der Bewehrung Schäden aufweisen. Ein Kathodischer Korrosionsschutz könnte dabei in vielen Fällen einerseits einen Neubau von geschädigten Brücken unnötig machen und andererseits die aufwändigen konventionellen Verfahren der Betonausbesserung und Reprofilierung ersetzen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Nach der Bestimmung einzelner Chloridprofile, des lokalen Zementgehaltes und des Bindemitteltyps unter Mithilfe der BAW und der RWTH Aachen im Vorfeld, wird ein Untersuchungsziel sein, möglichst viele Erfahrungen und Detailkenntnisse aus dem Betrieb der Kathodenschutz-Anlage der Brücke B 500 zu gewinnen, um die mögliche zukünftige Anwendung dieses Schutzverfahrens genauer und zielgerechter bei WSV-Bauwerken zu plazieren. Der Erkenntnisgewinn und die Untersuchungsergebnisse können langfristig auch als Grundlage für ein anvisiertes „Merkblatt KKS-B“ genutzt werden, an dem u. a. auch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ein großes Interesse hat.

Mit dem Untersuchungsprogramm werden grundsätzlich, durch genaue Verfolgung der Messdaten vor Ort, Erfahrungen für die WSV gesammelt. Zudem kann man durch die Verfolgung des Wechsels der äußeren Bedingungen, deren Einfluss auf die Erfassung der Messdaten und deren Interpretation, erkennen und zukünftig den Aussagewert z. B. der Potentialfeldmessung verbessern.

## 2 Untersuchungsmethoden

Nach dem Anschließen aller Fremdstromanoden wurden gezielt Versuche gefahren, die Aufschluss über die letztendliche Anodenanordnung, Treibspannung, Stromdichte und Auslegung der Kathodischen Schutzanlage liefern sollten. Eine noch nicht im Detail bekannte Größe ist die exakte Einordnung der gemessenen Potentialwerte. Neben der Betonart (Bindemitteltyp) und der Betondeckung gelten die Betontemperatur und seine Feuchtigkeit als maßgebliche Einflussparameter. Zur Verfolgung der variierenden Feuchtegehalte ist eine neuartige Ringelektrode eingesetzt worden. Diese Multiringelektrode bestehen aus acht Edelstahlringen (1.4571,  $d = 20,0$  mm,  $h = 5,0$  mm), die mit einem Achsabstand von 5,0 mm untereinander angeordnet sind und mit einem Pt1000 Temperaturfühler versehen ist. Zwischen zwei Edelstahlringen wird jeweils ein Polyethylen-(PE)-Isolerring eingebaut. Durch Messung des Wechselstromwiderstands (100 Hz bzw. 1000 Hz) zwischen zwei benachbarten Ringen kann ein Widerstandsprofil über die Einbautiefe des Sensors aufgezeichnet werden. Dabei ist eine Temperaturkompensation der gemessenen Betonwiderstände [ $k\Omega$ ] mit Hilfe der Betontemperatur (gemessen auf Höhe des innersten Rings), eine Umrechnung in spezifische Elektrolytwiderstände [ $\Omega \cdot m$ ] über die Zellkonstante möglich. Die hierbei erzielten, zum Teil widersprüchlichen Widerstandsverläufe werden nochmals gezielt überprüft und ggf. im Bereich der Ringelektroden gezielt und kontrolliert mit Wasser, zur Erhöhung von Beton- und Luftfeuchte benetzt. Ferner sollen vergleichende Potentialfeldmessungen von außen vorgenommen werden und deren Verschiebungen gegenüber den Messungen innen, nahe an der schlaffen Bewehrung, verfolgt werden. Auch eine stationäre elektronische Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit an insgesamt vier Stellen im Innern der beiden Hohlkästen ist vorgesehen.

## 3 Ergebnisse und weiteres Vorgehen

Im Frühjahr 2011 wurde die KKS-B-Anlage an der Straßenbrücke Iffezheim (B 500) in Betrieb genommen. Dabei wurde in zeitlichen Abständen die Funktionstüchtigkeit der Anlage durch Messungen der Potentialfeldwerte im Betrieb bzw. der tatsächlichen lokalen Schutzwirkung durch die Ermittlung der Ausschaltpotentiale und der dadurch erzielten Depolarisation ( $> 100$  mV) nach DIN EN 12969:2000-06 bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl an den diskreten Einzelanoden als auch in dem Bereich der Streckmetallgitteranoden die Ergebnisse auf nahezu optimalen Schutz hinweisen. Die Ausschaltpotentiale lagen dabei in Bereichen von  $-210$  und  $-450$  mV für den östlichen Bereich und bei  $-150$  bis  $-450$  mV für den westlichen Bereich der Brücke (Messelektrode:  $MnO_2$ ). Zudem ist festzustellen, dass die Ausschaltpotentiale oberhalb des Grenzpotentials für Spannbetonglieder gemäß DIN EN ISO 12696 und somit auf der sicheren Seite hinsichtlich einer möglichen Wasserstoffversprödung liegen. Das 100 mV-Funktionskriterium für die gemessene Depolarisation nach 24 Stunden konnte mittlerweile für alle vier Messbereiche beider Brückenteile (0m D, 26m D; 0m F, 26m F) erfüllt werden. Die angelegte Treibspannung (4,45 V) und der davon abzuleitende Schutzstrom konnte ursprünglich beibehalten werden (Bruns, M., Binder, G., 2013) und sollte sich zwischenzeitlich teilweise reduziert haben (s. Tabelle).

Da besonders der Betonwiderstand und damit die Stromstärke ( $I = U/R$ ) der lokalen Schutzströme durch Temperatur und Feuchte beeinflusst werden ( $R \sim 1/\text{rel. F\%}$ ), müssen zusätzlich die Temperatur und die Luftfeuchte, bzw. vor allem die Betonfeuchte, gleichzeitig erfasst werden. Zur Kontrolle von Feuchteverteilung in der Betonrandzone sind jeweils am Anfang und Ende des östlichen und westlichen Hohlkastens je zwei „Multiringelektroden“ angebracht worden. Aus den Langzeitbetrachtungen sind insbesondere die Einflüsse der Temperatur, Feuchtigkeit und der Betondeckung auf die Potentialfeldmesswerte wie auch letztlich auf die Stromverteilung bzw. den benötigten Schutzstrom abzuleiten bzw. zu bestimmen.

Die bei der nachträglichen Installation der vier Multiringelektroden bzw. deren Kalibrierung entstandenen elektronischen Fehler im Bereich der Messwerterfassung sind nun grundsätzlich behoben. Durch die künstliche Wässerung der Multiringelektroden konnten nun Zuordnungen der einzelnen Signale

der Widerstände an die jeweiligen Ringpositionen hergestellt werden. Bei der Erfassung der Lufttemperatur bzw. der relativen Luftfeuchtigkeit jeweils am Anfang und am Ende der Hohlkästen mit entsprechenden Loggern konnten kontinuierliche Messungen der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit an insgesamt vier Stellen im Innern der beiden Hohlkästen realisiert werden. Auf Grund der Möglichkeiten der Datenerfassung können zukünftig durch das Herausfinden von Extremwerten der Temperatur und der Feuchte (Raum bzw. Widerstand im Beton) besondere Situationen festgehalten werden, an denen die Treibspannung und der Schutzstrom der Gleichrichteranlage sich hinsichtlich ihrer Regelschwankungen verändern. Zu postulieren wäre dabei, dass mit zunehmendem Betonwiderstand (Erniedrigung der Feuchte) erhöhte Spannungen (Treibspannung in Volt) für die Aufrechterhaltung des Schutzstromes eingebracht werden müssten. Oder umgekehrt, wie die Tabelle 1 zeigt, dass zu unterschiedlichen Jahreszeiten bei jeweils gleichbleibenden Spannungswerten der KKS-Anlage unterschiedliche Ströme zu verzeichnen sind. Dies wird auf die Variation des elektrischen Widerstandes zurückgeführt, der wiederum von der Feuchtigkeit des Betons (wie in Zeiten hoher Luftfeuchtigkeit, wie z.B im August) abhängt.

Messdatum	26m D (Deutschland), Boden		26m F (Frankreich), Boden	
	PSI [A]	PSU [V]	PSI [A]	PSU [V]
13.03.2011	0,14	1,93	0,27	1,12
<b>02.08.2012</b>	0,20 !	2,13	0,56 !	3,53
03.01.2013	0,08	2,13	0,23	3,53
14.03.2013	0,06	2,13	0,17	3,53
<b>01.08.2013</b>	0,18 !	2,13	0,46 !	3,53
13.12.2013	0,06	2,13	0,16	3,53
06.12.2014	0,06	2,11	0,15	3,53

Tabelle 1: Strom und Spannungswerte der KKS-Anlage im Zeitenverlauf

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- Betrachtung und Auswertung vorliegender Messwerte zur Erfolgskontrolle an der Versuchsanlage Straßenbrücke Iffezheim - B500 (2014-2015)
- Messung der Potentiale nach dem Einbau der Kathodenschutzanlage, Überprüfung der Funktionstüchtigkeit durch Bestimmung des Ausschaltpotentials und durch die Erfüllung des 100 mV-Kriteriums (2011-2015)
- Verfolgung der Potential- und Strommesswerte durch naturbedingte Wechsel der Temperatur und Feuchtigkeit (2012-2015). Hier gibt es hoffnungsvolle Ansätze, die durch weitere Ermittlung der Datenreihe (die der BAW noch nicht zur Verfügung steht) zu bestätigen sind. Dadurch lässt sich dann der Zusammenhang von Feuchte und Stromeinbringung ableiten und letztlich eine gewisse Optimierung der Anlage herbeiführen.
- Messwertverfolgung nach künstlicher Anhebung der Betonfeuchte durch Rehydratisierung nach Wasserbeaufschlagung (evtl. 2016; Genehmigung des WSA hinsichtlich der Gewährleistung des Anlagenerrichters erst noch einzuholen).

Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 2017.

#### 5 Literatur

-/-

#### 6 Veröffentlichungen

Bruns, M., Binder, G. (2003): Umsetzung des Kathodischen Korrosionsschutzes an den Spannbetonüberbauten der Schleusenbrücke Iffezheim; Beton- und Stahlbetonbau, 108 (2013) 2, 104 - 115

## **Korrosionseigenschaften von Spundwandstählen**

**Netzplan-Nr.:** A39510270003

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. J. Ruppert, Abteilung Bautechnik, Referat Stahlbau, Korrosionsschutz (B2)

**E-Mail:** johannes.ruppert@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Korrosion von Spundwänden ist bedingt durch den Stahltyp, die Standzeit, das Immersionsmedium und der Tiefenlage bzw. Immersionszone. Von etwa 40 Bauwerken verschiedener Lokalitäten Deutschlands mit unterschiedlichen Standzeiten und Gewässertypen (Binnen-, Brack- oder Meerwasser) liegen mittlere Abrostungsdaten zum Vergleich vor. Bisher wurde bereits der Zusammenhang der Abrostung von Spundwandbauwerken mit zunehmender Standzeit untersucht. In Ergänzung dazu wurden Abrostungsmessungen mittels Ultraschall zur Bestimmung der Korrosionsraten durchgeführt und versucht Zusammenhänge mit den gemessenen Wasserparametern herzustellen. Hierzu wurde bisher vor allem die Bewertungszahl  $W_0$  für die Korrosivität von Gewässern nach DIN 50929 (Teil 3; 1985) und der Sauerstoffgehalt verwendet. Weiterhin wurden auch die chemischen Zusammensetzungen der verschiedenen Stähle nach ihrem Alter untersucht, Binder, G., Gabrys, U. (2011); Houyoux et.al (2007).

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) besitzt eine Vielzahl von Spundwandbauwerken (z. B. Uferbefestigungen oder Schleusen). Wenn die Korrosion besser diagnostizierbar wäre, könnten z. B. Standzeiten von Spundwandstählen besser vorhergesagt werden. Bei zu geringer errechneter Standzeit wären dann bauliche Veränderungen anzustreben um die Standzeit zu erhöhen. Zudem müssten seltener teure und zeitaufwendige Ultraschallmessungen an den Bauwerken durchgeführt werden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Durch elektrochemische Bestimmung der Korrosionseigenschaften vorliegender Stahlproben soll im Laborverfahren (Korrosionsmesszelle) deren generelle Anwendbarkeit und der Zusammenhang mit den realen Abrostungsverhältnissen überprüft werden. Damit können die Einflüsse der Stahlzusammensetzung sowie der unterschiedlichen Immersionsmedien dieser Bauwerke nachvollzogen werden und die maßgeblichen Einflussparameter erfasst werden. Untersuchungsziel wird sein, möglichst viele Erfahrungen und Detailkenntnisse der Korrosion von Spundwandstählen zu sammeln, um Laborversuche naturgetreuer fahren zu können und die Korrosion besser vorhersagen zu können. Hierbei könnten auch mikrobielle Korrosionsaspekte (MIC) Berücksichtigung finden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Erster Ansatz ist die Durchführung und Anpassung von Laborversuchen und der Vergleich mit Abrostungsraten in der freien Natur. Es werden Versuche mit einer Korrosionsmesszelle durchgeführt, in welcher die Stromdichte-Potential-Kurven verschiedener Stahlproben unter unterschiedlichen Gewässerbedingungen (Salinität, Sauerstoffkonzentration, Temperatur u. a.) aufgenommen werden können, aus welchen die theoretische Abrostungsgeschwindigkeit nach dem Faradayschen Gesetz berechnet werden kann.

### **3 Ergebnisse**

Als Standardversuchsbedingungen bei allen Versuchen wurde sich an die American Society for Testing and Materials (ASTM G5 – 87) angelehnt. Als Standardtemperatur für die Versuche wurden 20° C gewählt. Beim Magnetrührer wurden 200 rpm als Standard festgelegt was in etwa einer Fließgeschwindigkeit von 1,7 km/h entspricht. Dies ist ein Wert zwischen der Strömungsgeschwindigkeit z. B. des Rheins mit ca. 7 bis 8 km/h und den Känalen wie z. B. dem Mittellandkanal wo nahezu keine Strömung vorzufinden ist.



In Vorversuchen wurden verschiedene Rahmenparameter überprüft, auf welche hier nicht näher eingegangen werden soll. Diese waren:

- Probevorbereitung
- Reproduzierbarkeit
- Einfluss verschiedener Anionen und Kationen auf die Korrosion
- Rührgeschwindigkeit bzw. Fließgeschwindigkeit
- pH-Wert
- Temperatur

Bei Versuchen in Rheinwasser war sehr gut zu erkennen, dass mit steigender Temperatur die Sauerstoffkonzentration fiel. Bei der Auswertung wurde allerdings deutlich, dass der Effekt der Temperaturerhöhung stärker ist als der Effekt der Verringerung der Sauerstoffkonzentration womit die theoretische Abrostungsrate mit der Temperatur weiter ansteigt.

In einer Versuchsreihe wurde untersucht, ob der DOC (gelöster organischer Kohlenstoff) einen Einfluss auf den Korrosionsstrom bzw. die Korrosionsrate in der Messzelle hat. Dies wurde mit drei verschiedenen DOC-Quellen (Gallussäure, Salicylsäure und 2,4-Dihydroxybenzoesäure) und zwei verschiedenen Modellösungen (30 mmol Natriumchlorid und 10 mmol Natriumsulfat) überprüft. In allen Fällen zeigten sich keine signifikanten Unterschiede beim Korrosionsstrom. Der Einfluss von Organik wird derzeit noch in weiteren Testreihen untersucht.

Die theoretischen Abrostungsraten lagen bei Versuchen mit Wasser aus dem Rhein im Bereich von 70  $\mu\text{m/a}$  (entspricht 0,07 mm/a). Dies entspricht relativ gut den von der BAW gemessenen Abrostungsraten im Mittellandkanal (MLK) nach einer Standzeit von 8 Jahren und darüber. Aus den Daten aus einem vorherigen Forschungsprojekt, Binder, G., Gabrys, U. (2011) ergibt sich für Binnengewässer allerdings ein Mittelwert der Abrostungsraten (bei 15 verschiedenen Bauwerken) von ca. 40  $\mu\text{m/a}$ .

Bei Versuchen mit Brackwasser nach DIN 50905-4 ergab sich eine theoretische Abrostungsrate von ca. 180  $\mu\text{m/a}$ . Als Mittelwert der Abrostungsrate der 13 Brackwasserbauwerke aus dem voran gegangenen Forschungsprojekt ergibt sich ebenfalls ein niedrigerer Wert mit ca. 70  $\mu\text{m/a}$ . Das Brackwasser nach DIN hat eine elektrische Leitfähigkeit (ELF) von 12 mS/cm, während sich die ELF bei den Bauwerken in der Natur zwischen 8,0 und 26,9 mS/cm bewegt.

Zudem wurden Versuche mit 15 verschiedenen Spundwandstählen durchgeführt. Diese wurden nach deren Auffälligkeiten in ihrer chemischen Zusammensetzung ausgewählt). Dabei bewegen sich die Legierungselemente meist im Rahmen des Erlaubten für Baustahl nach DIN EN 10025-2.

Bei Versuchen in zwei verschiedenen Modellösungen (10mmol  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  und 30mmol NaCl) zeigten sich kaum Zusammenhänge zwischen der chemischen Beschaffenheit der Stahlprobe und der ermittelten theoretischen Abrostungsrate. Die Probe mit dem höchsten Kohlenstoffgehalt zeigte eine deutlich geringere Abrostungsrate gegenüber den anderen Proben. Die zweite Probe mit erhöhtem Kohlenstoffgehalt zeigte dieses Verhalten nicht. Dieser Stahl hat zudem aber noch einen erhöhten Mangengehalt. Die höchsten Abrostungsraten zeigte die Probe mit dem relativ höchsten Aluminiumgehalt. Anzumerken ist, dass alle überprüften Spundwandstähle in beiden Modellösungen dasselbe Ranking aufweisen und die Abrostungsraten in der  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ -Lösung durchgehend höher sind als in der NaCl-Lösung. In Veröffentlichungen lassen sich Einflüsse von Legierungen bei niedrig legierten Stählen in Laborexperimenten finden, Choi et al. (2004).

Mit allen 15 Proben wurden Versuche in einem Immersionsmedium durchgeführt welches der Natur angepasst werden sollte. Hierfür wurde Meerwasser und Brackwasser nach DIN auf die entsprechende ELF der Lokalität verdünnt. Bei einer ELF in der Natur unter 12 mS/cm wurde das Brackwasser verwendet, bei den restlichen Proben Meerwasser. Generell zeigte sich eine Erhöhung der Abrostungsrate mit der ELF. Weiterhin wurde ein Faktor aus dem Quotienten der Abrostungsrate aus der Natur und der Abrostungsrate im Labor gebildet, welcher abhängig vom Bauwerksalter ist. Bei Bauwerken die jünger als zehn Jahre alt sind, lag der Faktor bei 0,18; bei Bauwerken älter als 20 Jahren nur noch bei 0,09. Dies liegt an dem typischen Verlauf der Korrosion an Bauwerken, welche logarithmisch abnimmt.

In einer Testreihe zur Untersuchung der beiden Modelllösungen wurde festgestellt, dass bei gleicher ELF der Korrosionsstrom bei Brackwasser nach DIN höher lag als bei entsprechendem Meerwasser. Dies liegt an der nicht gleichen Zusammensetzung der beiden Modelllösungen.

Die Korrosionsströme wurden zudem mit einer 2010 von Paul (2010) veröffentlichten Formel, welche für Meerwasser gültig ist, verglichen. Hierbei zeigt sich eine gute Übereinstimmung des berechneten Korrosionsstromes nach Paul (2010) mit dem bestimmten Korrosionsstrom aus den Versuchen.

Da der  $W_0$ -Faktor nach DIN 50929-3 eine Näherung zur Berechnung der Korrosivität von Gewässern angibt, wurde eben dieser in einer Versuchsreihe überprüft. In der Natur liegt der  $W_0$ -Wert zwischen -11 für Meerwasser und 0 für Süßwasser. Umso negativer  $W_0$  dabei ist, desto höher ist die Korrosivität. Die Versuchsreihe zeigte eine relativ gute Korrelation im Labor zwischen der Abrostungsrate und dem  $W_0$ -Faktor zwischen -10 und +2.

Zudem wurden Versuche mit Wasser aus dem Rhein, der Nordsee und dem Atlantik durchgeführt und ebenfalls der  $W_0$ -Wert bestimmt.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015:

Sichtung vorhandener und relevanter Untersuchungen und Veröffentlichungen.

Begutachtung verschiedener Immersionsmedien und Erstellen eines Rankings relevanter, physikochemischer Gewässerparameter. Versuchsreihen zur Untersuchung der Bedeutung der verschiedenen Wasserparameter bei der Korrosion. Zusätzliche Versuche in der Korrosionsmesszelle mit unterschiedlichen Stahlproben und synthetischen See-, Brack- und Flusswasser bzw. Wasserproben von vor Ort. Diese Ergebnisse sollen dann mit Messwerten an Bauwerken verglichen werden (bis 06/2015).

Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 06/2015.

#### 5 Literatur

- American Society for Testing and Materials: ASTM G5 – 94 (2011): Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements; 2011
- Choi et. Al. (2004): Corrosion behavior of low alloy steels containing Cr, Co and W in synthetic potable water; Materials Science and Engineering.
- DIN 50905, Teil 4 (1987): Korrosionsuntersuchungen; Durchführung von chemischen Korrosionsversuchen ohne mechanische Belastung in Flüssigkeiten im Laboratorium; 1987.
- DIN 50929, Teil 3 (1985): Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung; Rohrleitungen und Bauteile in Böden und Wässern; 1985.
- DIN EN 10025, Teil 2 (2005): Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen, Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle; 2005.
- Binder, G., Gabrys, U. (2011): Bewertung der Korrosion von Spundwänden. FuE-Forschungsvorhaben der BAW; A39510210108..
- Hein, W. (1986): Über das Korrosionsverhalten von Stahlspundwänden im Mittellandkanal; Mitteilungsblatt der BAW.
- Houyoux, C. et.al (2007): Design method for steel structures in marine environment including the corrosion behaviour. Technical steel research.
- Paul, S. (2010): Model to study the effect of composition of seawater on the corrosion rate of mild steel and stainless steel; Journal of Materials Engineering and Performance.

#### 6 Veröffentlichungen

Poster-Veröffentlichung, Vergleich der Abrostungsraten von Stahl zwischen Natur und Labor; Jahrestagung Gesellschaft für Korrosionsschutz e. V.(GfKORR); Frankfurt 6./7. November 2012

**Materialkombinationen für das System Laufrad/Laufschiene**

Netzplan-Nr.: A39510270004

Projektleiterin: Dipl.-Ing. U. Gabrys, Abteilung Bautechnik, Referat Stahlbau, Korrosionsschutz (B2)

E-Mail: ulrike.gabrys@baw.de

**1 Problemdarstellung und Ziel**

**1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Auf Grund von vermehrt auftretenden Schäden an Laufrädern (Gegenkörper) oder Laufschiene (Grundkörper) an Verschlüssen des Stahlwasserbaus sollte das Rad-Schiene-System im Stahlwasserbau hinsichtlich vorteilhafter Materialkombinationen intensiv untersucht werden (Bild 1). In den geplanten Versuchen sind unterschiedliche, marktübliche, kostengünstige Materialkombinationen (maximal drei) mit verschiedenen Parametern wie z. B. Korrosionsbeständigkeit, Härte, Härteunterschiede und Verschleißfestigkeit zu untersuchen. Ziel ist es, ein am Markt verfügbares Rad-Schiene-System zu finden, dass unter den üblichen rauen Bedingungen für Stahlwasserbauten eine lange Nutzungsdauer aufweist und universell eingesetzt werden kann.

Zurzeit werden die unterschiedlichsten Materialkombinationen, wie z. B. unlegierte Stähle mit Schienestählen oder nichtrostende Stähle mit unlegierten Stählen, für das Rad-Schiene-System eingesetzt. In den letzten Jahren wurden bevorzugt die Auftragsgeschweißten Rollen bzw. Schienen eingebaut. Aber auch verschiedene nichtrostende Stähle, Stahlguss oder unlegierte Stähle sind zum Einsatz gekommen.

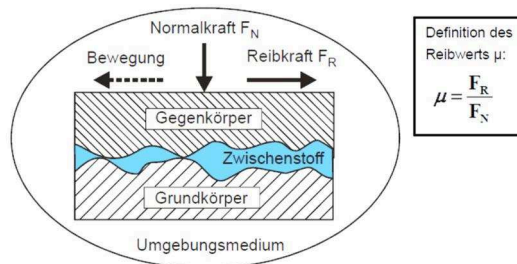


Bild 1: Beispielzeichnung für das Modell eines Tribologischen Systems (Durst, 2008)

Bei den Auftragsgeschweißten Rädern bzw. Schienen sind die Formeln der Hertzchen Pressung, wie sie in der DIN 19704 publiziert sind, nicht anwendbar, da die Auswirkungen der Pressungen in der Übergangsschicht nicht bekannt sind. Auch liegen wenige oder keine Untersuchungen über das Zusammenwirken der unterschiedlichsten Stähle in mit Schwebstoffen angereicherten Wässern vor. Hohe Drücke zwischen verschiedenen Materialien einhergehend mit im Wasser befindlichen Schwebstoffen können Schäden infolge Adhäsion, Abrasion, Korrosion oder Pitting hervorrufen. Zurzeit sind zwei Fragestellungen zu beantworten:

- Welche Materialien und welche Schichtdicken sind bei Auftragsgeschweißten Rädern bzw. Schienen erforderlich (anzuwenden)?
- Welche Materialien mit speziellen Oberflächenbehandlungsverfahren sind zum Einsatz als Rad-Schiene-System ebenfalls geeignet?

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Auf Grund der unterschiedlichsten Materialkombinationen sind in den letzten Jahren vermehrt Schäden durch elektrolytische Korrosion oder Abrasion an den Rädern oder Schienen aufgetreten. Um der WSV eine oder mehrere geeignete Systeme anbieten zu können, sind umfangreiche Versuche zur Beurteilung des tribologischen Systems erforderlich. Des Weiteren sollen Formeln zum Nachweis der Hertzchen Pressungen an Auftragsgeschweißten Rädern bzw. Schienen formuliert werden, die sicherstellen, dass es auf Grund der Pressung zu keiner Ablösung der Auftragsschweißung kommt. Das Maximum der Pressung liegt einige Millimeter unter der Oberfläche. Mit den zu entwickelnden

Formeln zum Nachweis der Hertz'schen Pressung soll sichergestellt werden, dass dieses Maximum nicht in der Übergangszone zwischen Grundmaterial und Auftragschweißung liegt. Somit wird zukünftig Planungssicherheit hinsichtlich des aufzuschweißenden Materials und der Dicke der Auftragschweißung erreicht. Diese Angaben sollen zukünftig auch Eingang in die DIN 19704-1 Stahlwasserbauten, Teil 1 - Berechnungsgrundlagen (2014) finden.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Standardisierung von möglichen, durch Versuche abgesicherten Materialkombinationen und deren tragsicherheitsrelevanten Nachweise (z. B. Hertz'sche Pressung).

### **2 Untersuchungsmethoden**

Tribologische Untersuchungen (unter Wasser, mit hohen Drücken und den im Stahlwasserbau üblichen Überrollungen) sollen an maximal drei unterschiedlichen Materialkombinationen durchgeführt werden. Die Materialkombinationen sind auf Grundlage einer Literaturrecherche und in Absprache mit den Neubauämtern der WSV noch festzulegen.

### **3 Ergebnisse**

Die Recherche nach geeigneten Prüfinstituten ist abgeschlossen. Die Festlegung der Materialkombinationen ist weitestgehend abgeschlossen. Es liegen jedoch noch keine Versuchsergebnisse vor. In 2014 konnten aus terminlichen Gründen keine Leistungen erbracht werden.

### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2015: Festlegung des Versuchsumfanges, Ausschreibung und Vergabe der Versuche, Beginn der tribologischen Versuche an einem System.

2016: Fortführung der tribologischen Versuche an zwei weiteren Laufrad-/Laufschiene-Systemen

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2016.

### **5 Literatur**

Durst, O. (2008): Korrosions- und Verschleißigenschaften neuartiger, kohlenstoffhaltiger PVD-Schichten. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Institut für Werkstoffkunde.

### **6 Veröffentlichungen**

-/-

## **Einfluss von Korrosion auf die Ermüdungsfestigkeit von Stahlwasserbaukonstruktionen**

**Netzplan-Nr.:** A39510270005

**Projektleiter:** Dipl.-Ing T. Hesse, Abteilung Bautechnik, Referat Stahlbau, Korrosionsschutz (B2)

**E-Mail:** thomas.hesse@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

In den aktuell gültigen Bemessungsregeln für den Stahlbau (Eurocode) ist ein negativer Einfluss von Korrosion auf die Ermüdungsfestigkeit nicht berücksichtigt. Stahlwasserbauteile sind ihrer Bestimmung entsprechend, im Normalfall, einer permanenten Belastung durch Süß- oder Seewasser ausgesetzt. Die praktische Erfahrung zeigt, dass bei Stahlwasserbauteilen der Korrosionsschutz nicht über die gesamte Lebensdauer in einem einwandfreien Zustand ist, sondern dass es insbesondere im Bereich von Kanten, Ecken, Anschlüssen und Schweißdetails zu Korrosionsschäden kommt.

Es stellt sich daher die Frage, ob eine Überprüfung der Ermüdungsfestigkeit nach Eurocode für Stahlwasserbaukonstruktionen ausreichend ist, oder ob durch Korrosionseinfluss die Ermüdungsfestigkeiten so weit reduziert werden, dass sich daraus eine signifikante Verringerung der ertragbaren Lastspielzahlen ergibt.

Recherchen zum bereits vorliegenden Wissen zu diesem Thema haben ergeben, dass eine negative Beeinflussung der Ermüdungsfestigkeit durch Korrosion zu vermuten ist. Gesicherte Erkenntnisse, insbesondere zur genauen Größe der Beeinflussung, liegen aber noch nicht vor.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Im Bereich der WSV gibt es zahlreiche ermüdungsbeanspruchte Stahlwasserbaukonstruktionen (Schleusentore), die sich dauerhaft im Wasser bzw. im Wasserwechselbereich befinden. Daher ist es notwendig, zu überprüfen, ob die Bemessung auf Ermüdungsfestigkeit nach Eurocode für den Spezialbereich Stahlwasserbau in jedem Fall zutreffend und ausreichend sind.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Projektziel ist die Ermittlung der Reduktionsraten der Ermüdungsfestigkeit infolge Korrosion für verschiedene Randbedingungen. Weiterhin soll überprüft werden, ob trotz Verminderung der Ermüdungsfestigkeit infolge Korrosion die für den entsprechenden Kerbfall maßgebenden Wöhlerlinien nach Eurocode 3 erreicht werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

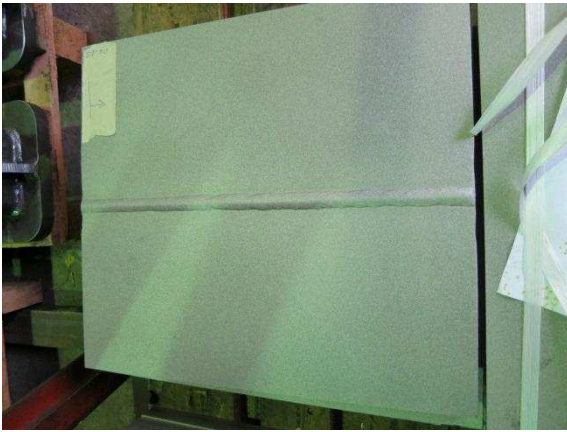
Die Ermüdungsfestigkeit durch Korrosion geschädigter Probekörper soll durch Schwingversuche verifiziert werden. Die entsprechenden Probekörper werden aus Blechen gewonnen, die über einen Zeitraum von zwei Jahren unter für den Stahlwasserbau üblichen Umgebungsbedingungen (ungünstigster Fall: Wasserwechselbereich) gelagert werden.

### **3 Ergebnisse**

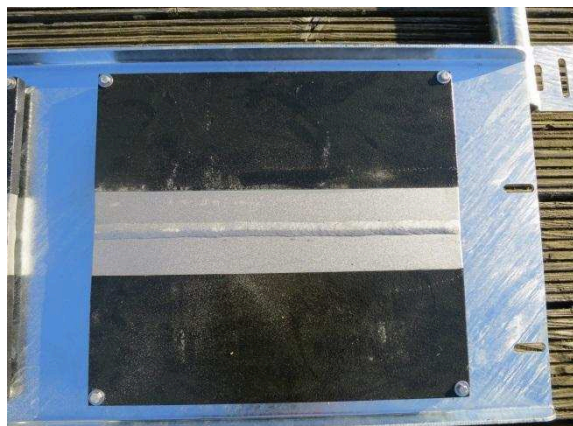
Die Projektplanung und -vorbereitung wurde im Mai/Juni 2013 durchgeführt. Für die Herstellung der Prüfbleche und für die Durchführung der Schwingversuche wurden Spezifikationen erstellt, die die Grundlage für die Vergabe dieser Leistungen bilden.

Als Auslagerungsstandort Meerwasser wurde der bestehende BAW-Auslagerungsstand in Kiel ausgewählt. Dieser befindet sich im Zuständigkeitsbereich des WSA Lübeck, Außenbezirk Kiel. Als Auslagerungsstandort Süßwasser wurde ein schwimmender Schiffsanleger im Rheinhafen Karlsruhe ausgewählt. Der Eigentümer des Anlegers, die Karlsruher Versorgungs- Verkehrs- und Hafen GmbH, erteilte seine Zustimmung und unterstützt das Projekt.

Für die Vergabe der Stahlbauarbeiten und der Schwingversuche wurden entsprechende Vergabeverfahren durchgeführt. Die Stahlbauarbeiten wurden im Juni 2013 an ein Karlsruher Stahlbauunternehmen vergeben. Nachdem die Fertigung Anfang November 2013 abgeschlossen war, wurden die Prüfbleche im November/ Dezember 2013 ausgelagert.



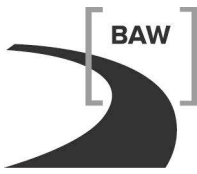
*Bilder 1 und 2: Prüfbleche nach den Sandstrahlen*



*Bilder 3 bis 6: Prüfbleche für Binnenauslagerung auf Befestigungskonstruktion montiert*

Die Schwingversuche wurden im September 2013 an das KIT Stahl- und Leichtbau, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine in Karlsruhe vergeben.

Im Jahr 2014 befanden sich die Prüfbleche unter Bewitterung. Für Anfang 2015 ist sowohl am Binnen- als auch am Seestandort eine Zwischenbegutachtung der Prüfbleche vorgesehen.



#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2015: Auslagerungszeit der Prüfbleche (Bleche stehen unter Bewitterung)

2016: Durchführung der Schwingversuche und Auswertung

Laufzeit des Vorhabens: 05/2013 bis 2016.

#### **5 Literatur**

-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

-/-

**Frostwiderstand zementgebundener Baustoffe****Netzplan-Nr.:** A39510308099**Projektleiter:** Dipl.-Ing. A. Westendarp, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)**E-Mail:** andreas.westendarp@baw.de**1 Problemstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Bei Mörteln und Betonen gemäß DIN 1045 und ZTV-W LB 215 geht man davon aus, dass bei Wahl bestimmter Betonausgangsstoffe und Einhaltung bestimmter Grenzwerte bei der Betonzusammensetzung mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ein Beton mit hohem Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand erzielt wird (design concept). Angesichts der rasanten technischen Entwicklung auf dem Baustoffsektor, eines grenzüberschreitenden europäischen Marktes und einer im Verkehrswasserbau im Vergleich zu Betonbauwerken nach DIN 1045 auf bis zu 100 Jahre verlängerten Nutzungsdauer wird es zunehmend erforderlich, dieses auf langjährigen Erfahrungen mit bestimmten Baustoffen und Bauverfahren basierende Konzept durch eine direkte Prüfung des Frostwiderstandes des Betons (performance concept) zu ergänzen bzw. zu ersetzen. Weder im Verkehrswasserbau noch in anderen Baubereichen sind bislang (mit Ausnahme der ZTV-W LB 215 und 219) auf nationaler Ebene die für die Anwendung des performance concept notwendigen Frostprüfverfahren und Abnahmekriterien festgelegt worden. Von maßgeblicher Bedeutung für die Intensität eines Frostangriffes auf Beton und damit auch für Prüfverfahren und Abnahmekriterien sind die Temperaturbeanspruchung und der Wassersättigungsgrad des jeweiligen Betons. Über die Größenordnung beider Parameter im Bauwerk lagen kaum Informationen vor.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Verkehrswasserbauwerke unterliegen aufgrund spezifischer Randbedingungen (direkte Beaufschlagung mit Süß- bzw. Meerwasser in Verbindung mit einer großen Anzahl von Frost-Tau-Wechseln infolge betriebs- und/oder gezeitenbedingter Wasserstandsänderungen) einer besonders intensiven Frostbeanspruchung. Gleichzeitig müssen, zumindest bei massigen Betonbauteilen wie beispielsweise Schleusenammerwänden, aufgrund der Hydratationswärmeproblematik Betonzusammensetzungen gewählt werden, die hinsichtlich der Dauerhaftigkeit im Grenzbereich einzuordnen sind. Der Risikominimierung (zielsichere Vermeidung von Betonen mit unzureichendem Frostwiderstand) kommt im Verkehrswasserbau angesichts der eingesetzten Betonkubaturen und der eingeschränkten Möglichkeiten einer ggf. erforderlichen Betoninstandsetzung aufgrund unzureichenden Frostwiderstands des Betons eine erhebliche Bedeutung zu.

**1.3 Untersuchungsziel**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden im Wesentlichen folgende Ziele verfolgt:

Festlegung bzw. Verifizierung wasserbauspezifischer Frostprüfverfahren und Abnahmekriterien, Beantwortung verschiedener wasserbauspezifischer Grundsatzfragen zum Frostwiderstand zementgebundener Baustoffe (insbesondere tatsächliche Temperaturbeanspruchung und tatsächlicher Sättigungsgrad des Betons von Wasserbauwerken).

**2 Untersuchungsmethoden**

Das Forschungsvorhaben ist in drei parallel zu bearbeitende Teile gegliedert:

Teil I:

Untersuchung von Betonen aus bestehenden Bauwerken sowie Auslagerung und Untersuchung von gesondert hergestellten Betonen zur Ermittlung von Materialkennwerten, zur Beurteilung des Zusammenhanges zwischen Laborprüfung und Bauwerksverhalten und zur Verifizierung der Frostprüfung gemäß ZTV-W LB 219 (heute: BAW Merkblatt „Frostprüfung von Beton“).



**Teil II:**

Ermittlung der tatsächlichen Temperaturbeanspruchung und des Wassersättigungsgrades im Beton von Verkehrswasserbauwerken. Im Hinblick auf die tatsächliche Temperaturbeanspruchung wurden u. a. die bei der Begutachtung der Schleusenanlage Eckersmühlen gewonnenen Ergebnisse ausgewertet. Zur Bestimmung des sich tatsächlich in der Betonrandzone von Verkehrswasserbauwerken in verschiedenen Tiefenhorizonten einstellenden Feuchtigkeitsgehaltes werden gemeinsam mit der RWTH Aachen Untersuchungen an zwei neu errichteten und an einem bestehenden Bauwerk durchgeführt. Als Messeinrichtungen wurden Temperaturfühler und Multi-Ring-Elektroden (MRE) in den Beton eingebaut.

**Teil III:**

Unterstützung der Aktivitäten der Arbeitsgruppe "Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse" des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb).

**3 Ergebnisse****Teil I:**

Aus verschiedenen Schleusen am Main-Donau-Kanal und an der Mosel sind Bohrkernproben entnommen worden, die in der BAW untersucht wurden. In 2001 und 2002 sind in der BAW umfangreiche Untersuchungen an gesondert hergestellten, verkehrswasserbautypischen Betonen sowie an Betonen nach EN 206 durchgeführt worden. In den Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein wurden in 2003 gemeinsam mit der RWTH Aachen und der Fa. CEMEX Betonprobekörper ausgelagert, welche unter Verwendung von CEM III/A hergestellt worden sind. Der Abschlussbericht wird derzeit fertiggestellt. Die restlichen ausgelagerten Prüfkörper bleiben bis auf weiteres im Sparbecken ausgelagert. In 2009 wurde im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ein Fertigteil aus dem Projekt Instandsetzung Schleusen Üfingen/Wedtlenstedt ausgelagert, welches nach Laboruntersuchungen einen unzureichenden Frostwiderstand aufweist. Möglichen Schadensursachen wurde im Rahmen von Grundsatzuntersuchungen nachgegangen und die Ergebnisse im Juli 2010 in einem Bericht zusammengefasst. An dem ausgelagerten Fertigteil werden Grundsatzuntersuchungen zum Verhalten des Betons unter Praxisbedingungen durchgeführt.

**Teil II:**

Die Temperaturmessungen an der Schleusenanlage Eckersmühlen sind ausgewertet und veröffentlicht worden (Westendarp, Schulze, 2000, Westendarp et. al, 2005).

Messaufnehmer für die Bestimmung von Temperaturen und Feuchtigkeitsgehalten wurden in einer Kammerwand der Doppelschleuse Hohenwarthe sowie in verschiedenen Sparbeckenwänden der Schleuse Hilpoltstein installiert (Westendarp, 2009; Spörel, Westendarp, Brameshuber, 2009; Spörel, 2010, 2012). Danach sind jahreszeitliche Schwankungen des Sättigungsgrades in den Expositionen unter mäßiger Sättigung (XF1) wesentlich stärker ausgeprägt als unter hoher Sättigung (XF3). Hohe Sättigungsgrade treten in den Expositionsklassen XF1 und XF2 als seltene Spitzenwerte auf, an die sich in der Regel eine Trocknungsphase anschließt. Bei Bauteilen mit ständigem oder periodischem Wasserkontakt wie beispielsweise Schleusen lag der Sättigungsgrad des Randbereiches in der Wasserwechselzone hingegen weitgehend konstant und entsprach etwa der betonspezifischen Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck. Derart hohe Wassersättigungsgrade in Verbindung mit ausgeprägten Temperaturänderungen infolge betriebsbedingter Wasserstandsänderungen führen bei Verkehrswasserbauwerken zu Frostbeanspruchungen, die für deutsche Gegebenheiten dem pessimalen Bereich zuzuordnen sind. Die Ergebnisse wurden im Rahmen einer Dissertation verarbeitet (Spörel, 2013).

Zur Erweiterung der Datenbasis wurde die Schleuse Kersdorf während der Bauphase mit dem gleichen Messsystem wie die Schleusen Hohenwarthe und Hilpoltstein ausgerüstet. Die Schleuse ging 2013 in Betrieb und liefert erste Messdaten unter Betriebsbedingungen. Derzeit erfolgt die Kalibrierung.

Zur Erfassung einer XF3-Beanspruchung an horizontalen Flächen wurde in 2012 eine Betonplatte hergestellt und analog zu den Bauwerksmessungen mit Temperatursensoren und MRE ausgestattet.

Bislang wurden Daten über zwei Winter auf dem Gelände der BAW aufgezeichnet. Die Kalibrierung ist weitgehend abgeschlossen und die Platte wird an der Schleuse Hilpoltstein ausgelagert.

Teil III:

Die bisher vorliegenden Ergebnisse des Forschungsvorhabens haben unmittelbaren Eingang in die Arbeit der Arbeitsgruppe "Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse" des DAfStb gefunden. Die BAW und der DAfStb haben der Universität Karlsruhe den Auftrag zur Erstellung des Abschlussberichtes der o. g. DAfStb-Arbeitsgruppe erteilt. Dieser Abschlussbericht wurde in 2009 fertig gestellt und in 2010 als DAfStb-Heft 577 publiziert.

Teile I bis III:

Die Ergebnisse und Erkenntnisse des Forschungsvorhabens sind auch in die Erarbeitung des BAW-Merkblattes "Frostprüfung von Beton" eingeflossen, welches zum 01.01.2005 in den Geschäftsbereich der WSV eingeführt worden ist, und für den Neubaubereich (ZTV-W LB 215 (Ausgabe 2012)) und für die Betoninstandsetzung (ZTV-W LB 219 (Ausgabe 2013)) in Bezug genommen wird.

Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) hat bei den Frostprüfungen für seine Zulassungsuntersuchungen an Zementen und Betonen auf das CIF- bzw. CDF-Verfahren umgestellt und sich bei Vorgehensweise und Abnahmekriterien eng am BAW-Merkblatt "Frostprüfung von Beton" orientiert.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Teil I:

Die bisher vorliegenden Ergebnisse zu Teil I des Vorhabens sollen ausgewertet und publiziert werden.

Teil II:

Die Datenaufzeichnung an den Schleusen Hohenwarthe, Hilpoltstein und Kersdorf werden fortgesetzt. Die Kalibrierung der Messungen an der Schleuse Kersdorf wird begonnen. Die XF3(horizontal)-Platte wird an der Schleuse Hilpoltstein ausgelagert. Die weiteren dortigen Auslagerungen werden fortgesetzt.

Zeitplan:

Der Abschluss des Gesamtvorhabens und die Erstellung des FuE-Berichtes erfolgt im Jahr 2015. Die über 2015 hinausgehenden Aktivitäten (längerfristige Beobachtungen der ausgelagerten Prüfkörper, des Fertigteils und der horizontalen XF3-Platte sowie die Datenaufzeichnungen an den Schleusen Hohenwarthe, Hilpoltstein und Kersdorf) werden im Rahmen eines Folgevorhabens durchgeführt.

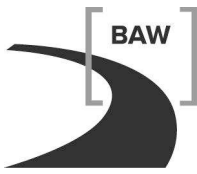
Laufzeit des Vorhabens: 1999 bis 2015.

#### **5 Literatur**

-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

- Westendarp, A.; Schulze, M. (2000): Frostbeanspruchung von Verkehrswasserbauwerken. Beton, Band 50, Heft 5, S. 206-212
- Westendarp, A. et al. (2005): Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 560
- Westendarp, A. (2009): Wasserbauwerke unter Frostbeanspruchung. 6. Symposium "Baustoffe und Bauwerkserhaltung", Univ. Karlsruhe, 12. März 2009
- Spörel, F.; Westendarp, A.; Brameshuber, W. (2009): Frostbeanspruchung von Schleusenbauwerken. Tagungsband 17. Internationale Baustofftagung ibausil in Weimar, S. 2-735 – 2-740
- Spörel, F. (2010): Bauwerke des Wasserbaus unter Frostbeanspruchung. Frostkolloquium des DAfStb, BAW, BaSt, Berlin, 21. Januar 2010.
- Spörel, F. (2010): Bauwerksmessungen. Tagungsband, 39. Aachener Baustofftag, ibac, 25. März 2010



- Spörel, F. (2010): Dauerhaftigkeit Bauwerke: Frostwiderstand zementgebundener Baustoffe. Tagungsband BAW-Kolloquium "Forschung und Entwicklung im Küstenverkehrswasserbau", Hamburg, 26./27. April 2010, S. 51-58
- Spörel, F. (2010): Frostbeanspruchung von Wasserbauwerken am Beispiel der Schleuse Hohenwarthe. VDB Regionalgruppentagung, Juli 2010, Rheinfelden
- Spörel, F. (2012): Freeze-Thaw attack on concrete structures. Proc. of the 9th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Karlsruhe, S. 667-672
- Spörel, F. (2013): Frostbeanspruchung und Feuchtehaushalt in Betonbauwerken. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 604

## **Instandsetzungssysteme für alte Wasserbauwerke**

**Netzplan-Nr.:** A39510310127

**Projektleiter:** Dr.-Ing. T. Reschke, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** thorsten.reschke@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Für die Verkehrswasserbauwerke der WSV und hier insbesondere für die massiven Betonbauteile zeichnet sich mittelfristig ein erhöhter Instandsetzungsbedarf ab. Die Ursachen hierfür sind vor allem auf das vergleichsweise hohe Alter vieler Anlagen und die daraus resultierenden Dauerhaftigkeitsprobleme infolge jahrzehntelanger Beanspruchung unterschiedlichster Art zurückzuführen. Für die Instandsetzung der Betonbauteile dieser Bauwerke stehen bewährte Materialien und Verfahren zur Verfügung, die unter bestimmten Randbedingungen eingesetzt werden können. Es gibt jedoch Fälle, bei denen die bislang verwendeten Instandsetzungssysteme ungeeignet sind. Forschungsbedarf ergibt sich insbesondere in zwei Bereichen:

Bei bestimmten Bauwerken, wie z. B. Einkammerschleusen, kann eine mehrmonatige Außerbetriebnahme für die Instandsetzung nicht akzeptiert werden. Es sind daher Instandsetzungssysteme zu konzipieren, die eine Instandsetzung in begrenzten Zeitfenstern „unter Betrieb“ zulassen.

Die für Schleusenammern bewährte Instandsetzung durch dicke, rückverankerte Vorsatzschalen ist prinzipiell für alle Wasserbauwerke möglich. Es gibt aber auch eine Reihe Bauwerke (wie z. B. Wehrpfeiler), bei denen zur Aufrechterhaltung der Dauerhaftigkeit lediglich der oberflächennahe Beton zu schützen ist, Oberflächenschutzsysteme aufgrund der Feuchteexposition jedoch versagen. Als vielversprechende Lösung für solche Fälle wird die Entwicklung „dünn-schichtiger“ Instandsetzungssysteme als Ort- oder Spritzbeton angesehen.

Die Entwicklung neuer Instandsetzungssysteme hat in den letzten Jahren aufgrund der intensiven Materialentwicklung einiger Hersteller große Fortschritte gemacht. Einerseits wurden schnell erhärtende Systeme entwickelt, deren Eignung z. T. bereits an Wasserbauwerken überprüft wurde (Reschke, 2011). Andererseits wurden im Rahmen von Feldversuchen an Wasserbauwerken einige Instandsetzungssysteme in ihren Eigenschaften z. T. so modifiziert, dass auch bei Altbetonen geringerer Güte ein guter und dauerhafter Verbund sichergestellt wurde (IMF Feldversuch 1998 und 2002), womit eine Applikation in Form dünn-schichtiger Vorsatzschalen grundsätzlich möglich wird.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Mit schnell erhärtenden Instandsetzungsbetonen können die Betoninstandsetzungsmaßnahmen so konzipiert werden, dass eine Unterbrechung der Schifffahrt nur innerhalb sehr eng bemessener Zeitfenster (wenige Stunden pro Tag) notwendig wird. Somit können auch bei Wasserstraßen mit nur einer Schleusenammer (z. B. Mosel, oberer Main) Sperrungen für die Schifffahrt, welche bei größeren Baumaßnahmen ca. ½ - 1 Jahr dauern können und ggf. zu einer Verlagerung des Transportaufkommens auf Schiene und Straße führen, vermieden werden.

Durch die Entwicklung von Instandsetzungssystemen in Form dünn-schichtiger Vorsatzschalen kann für eine Reihe von Bauwerken die Nutzungsdauer durch eine dauerhafte und gegenüber den dicken Vorsatzschalen deutlich kostengünstigere Instandsetzung verlängert werden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Im Rahmen dieses FuE-Vorhabens soll die Eignung von Instandsetzungssystemen getestet werden, die ggf. beide Eigenschaften (schnell erhärtend und dünn-schichtig) vereinen. Bei entsprechendem Nachweis der Materialeignung sowie der Technologie soll die Anwendung der Systeme für die WSV zugänglich gemacht werden.

## 2 Untersuchungsmethoden

Im ersten Schritt sollen zunächst die Materialeigenschaften bezüglich der wasserbauspezifischen Anforderungen an kleineren Verbundprobepplatten von ca. 0,5 m<sup>2</sup>, welche von den Materialentwicklern zur Verfügung zu stellen sind, im Baustofflabor geprüft werden.

Bei entsprechender Eignung sollen im 2. Schritt Probeflächen größerer Abmessungen von jeweils ca. 15 m<sup>2</sup> im Rahmen eines Technologieversuches hergestellt werden. Dabei soll neben der Materialeignung auch die Frage der Applikation (Spritzbeton oder Ortbeton) untersucht werden, was ggf. mit der Entwicklung spezieller Schalungssysteme verbunden ist. Aus den Probeflächen werden wiederum Proben entnommen und bezüglich der wasserbauspezifischen Anforderungen im Baustofflabor geprüft.

Nach erfolgreichem Abschluss der Technologieversuche soll im 3. Schritt die Anwendbarkeit und Dauerhaftigkeit durch Probeinstandsetzungen an Verkehrswasserbauwerken verifiziert werden.

## 3 Ergebnisse

Die Eignung verschiedener, gemäß den Vorgaben der neuen ZTV-W LB 219 speziell angepasster Instandsetzungsmaterialien wird im Rahmen eines „Technologieversuches“ an größeren Probeflächen getestet. Dafür wurde auf dem Gelände der BAW eine 10 m lange und 2 m hohe Versuchswand mit einem Stampfbeton geringer Festigkeit errichtet. Die besondere Struktur alter Wandflächen wurde durch anschließendes Abstrahlen mit HDW erreicht.

Im Sommer 2005 wurden auf die ersten vier Teilflächen á 2,5 m x 2,0 m unterschiedliche Instandsetzungsmörtel SPCC mit an die geringe Betonqualität des Untergrunds angepassten Eigenschaften appliziert, welche z. T. hinsichtlich des Schwindverhaltens und E-Moduls modifiziert waren.

Im Oktober 2009 wurde auf die fünfte Teilfläche á 2,5 m x 2,0 m ein schnell erhärtendes Material in Ortbetonbauweise (geschaltes System) aufgebracht. Das Material (ein SCC) war so konzipiert, dass es sich selbst verdichtet.

Alle Flächen wurden in den vergangenen Jahren regelmäßig bewertet. Neben der augenscheinlichen Beurteilung auf Rissbildungen wurde das Verbundverhalten untersucht. Die Verbundfestigkeiten zeigen, dass es bislang zu keiner Verbundschwächung gekommen ist. Die spezielle Anpassung der Materialien im Hinblick auf die Begrenzung des Schwindens und E-Moduls hat sich demnach grundsätzlich bewährt.

Aufgrund einer flächigen Schalenabplatzung im Tidebereich an einem Wehrpfeiler des Eidersperrwerks ergab sich im August 2013 die Gelegenheit, einen schnell erhärtenden Instandsetzungsmörtel unter Bauwerksbedingungen zu erproben. Als Material wurde der an der BAW-Versuchsfläche in 2009 eingesetzte schwindreduzierte SCC (geschaltes System) ausgewählt. Dieser wurde für den Einsatz im Meerwasserwechselbereich (Expositionsklasse XF4) mit Luftporen modifiziert.

Die Applikation des SCC erfolgte von einem Arbeitsponton. Das Zeitfenster bis zum Fluten der Reparaturfläche durch die ansteigende Tide betrug nur rund 6 Stunden. Innerhalb dieser Zeit wurde die Fläche gereinigt, die vorbereitete Schalung fixiert und der SCC so eingefüllt, dass er bis zum ersten Kontakt mit dem Meerwasser ausreichend erhärtet war (mindestens 3 Stunden). Dieses Konzept der Instandsetzung in einem kurzen Zeitfenster hat sich grundsätzlich bewährt. Die Dauerhaftigkeit muss jedoch durch eine längerfristige Beobachtung und Probenahmen am Bauwerk nachgewiesen werden.

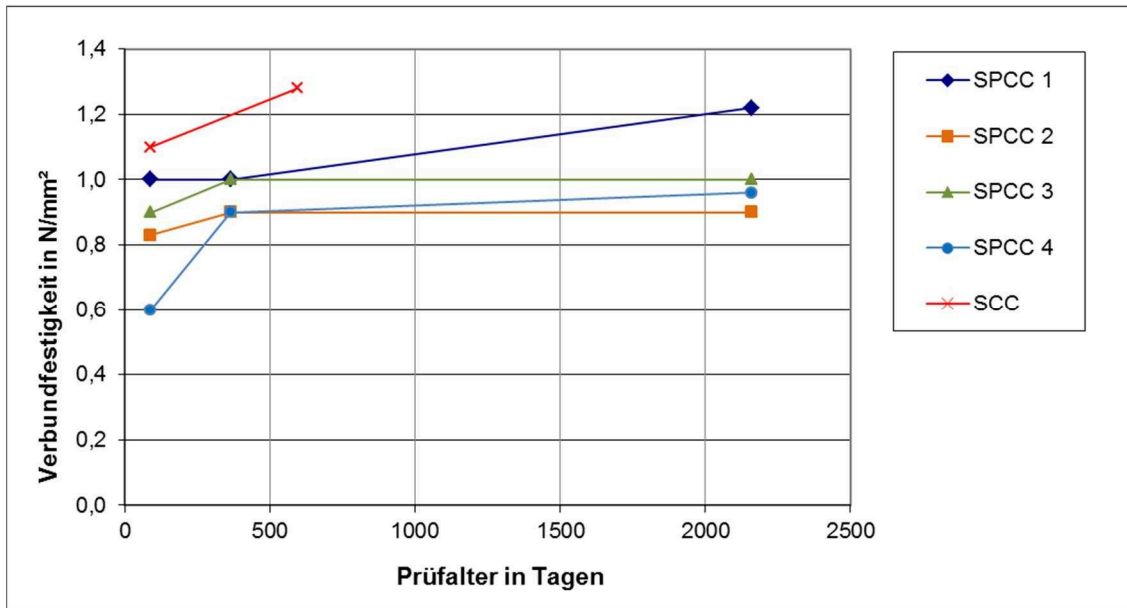


Bild 1: Verbundfestigkeit der Materialien an den Probeflächen der BAW



Bild 2: Reparaturfläche Eidersperwerk im Sommer 2014

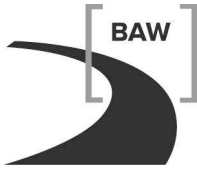
#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015:

Die bestehenden Versuchsflächen auf dem Gelände der BAW mit den SPCC-Systemen sowie mit dem selbstverdichtenden Instandsetzungssystemen (SCC) werden abschließend beprobt und bewertet.

Die im Sommer 2013 am Eidersperwerk im Meerwasserwechselbereich mit dem SCC-LP angelegte Instandsetzungsfläche soll auch nach Ablauf des FuE-Vorhabens weiter regelmäßig beobachtet und beprobt werden.

Laufzeit des Vorhabens: 2003 bis 2015.



## **5 Literatur**

IMF AG: Feldversuch 1998 und 2002

## **6 Veröffentlichungen**

Reschke T. (2011): Instandsetzung unter Betrieb mit einem schnell erhärtenden Spritzbeton – Probe-  
maßnahme Schleuse Feudenheim. BAW-Mitteilungsblatt 2011; Nr. 93: 7-28.

## **Injektion Vorsatzschale**

**Netzplan-Nr.:** A39510310234

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. (FH) H. Müller, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** hilmar.mueller@baw.de

## **1 Problemstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Der Kernbeton von älteren Schleusenammerwänden wird oft durch Vorsatzschalen vor Nassfrost-einwirkung und Witterungsbeanspruchung geschützt. In der Verbundzone kommt es durch eindringendes Schleusenwasser zu Verbundstörungen und Ablöseerscheinungen der Vorsatzschale vom Kernbeton. Der Spaltwasserdruck wirkt auf immer größere Flächen hinter der Vorsatzschale. Die Standsicherheit der Vorsatzschale ist ab einem bestimmten, schwer einzuschätzenden Zeitpunkt, nicht mehr gewährleistet.

Neue am Markt befindliche Injektionsmaterialien können zielgerichtet in die Verbundzone injiziert werden. Durch die Steuerung der Konsistenz und Aushärtungscharakteristika werden diese Injektionsmaterialien zielgenau platziert. Die Eigenschaften dieser Materialien reichen von spröde bis elastisch.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Möglichkeit der Erhaltung von abgängigen Vorsatzschalen ist für die WSV von grundlegender Bedeutung. Sperrzeiten für Instandsetzungen könnten minimiert werden. Die Kosten für die Erhaltung einer Vorsatzschale dürften unter der eines Austausches liegen. Die Auflagen von Denkmalschützern sind leichter einzuhalten.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel der Untersuchungen soll die Auswahl geeigneter Injektionsstoffe und Verfahren sein. Weiter sollen Parameter für die Ausführbarkeit und Qualitätskontrolle solcher Arbeiten ermittelt werden.

## **2 Untersuchungsmethoden**

Ein Kammerwandblock der neuen Schleuse Hüntel wurde in vier Versuchsflächen aufgeteilt. Die Vorsatzschale der Versuchsflächen wurde von Mitte April 2007 an während einer Trockenlegung oberflächlich instand gesetzt, indem defekte Klinker und Mörtelfugen ausgetauscht wurden. Die so instand gesetzte Vorsatzschale wurde mit einer Radarantenne abgefahren und auf diese Weise der Ausgangszustand festgehalten und dokumentiert. Weiter wurden WD-Versuche jeweils in Probenfeldmitte im vorsatzschalennahen Kernbeton durchgeführt, um die Wasseraufnahme der Fehlstellen im Kernbeton einschätzen zu können.

In die vier Probeflächen wurden unterschiedliche Materialgruppen (Zementsuspension, Zementleim, Acrylatgel, PUR-Harz) injiziert. Die Injektionen werden durch ein umfangreiches Untersuchungsprogramm, welches vom Institut für Massivbau der Universität Duisburg-Essen durchgeführt worden ist, begleitet.

Nach der Injektion wurden erneut Radarmessungen und WD-Versuche als indirekte Messverfahren durchgeführt. Hiermit sollten die Veränderungen zu den Nullmessungen und damit der Injektionserfolg beurteilt werden. Die Auswertung der Radarmessungen erfolgte durch igp in Karlsruhe. Weiter wurden Ausziehversuche an den injizierten Versuchsflächen vorgenommen und die gezogenen Elemente und die Bruchflächen augenscheinlich beurteilt.

An der gegenüberliegenden Kammerwand wurden Nischen mit Hochdruckwasserstrahltechnik in die Kammerwände gefräst. In diese Nischen wurden während der Trockenlegung neue Pollerreihen



eingebaut. An den Ausbruchflächen konnten die Struktur des Kernbetons mit seinen Fehlstellen aufgenommen und das theoretische Injektionsmodell verifiziert werden.

In einem weiteren Schritt wurde je Versuchsfeld eine Vertikalbohrung in der Verbundzone abgeteuft. Die Bohrungen wurden im Seilkernrohrverfahren mit Inliner durchgeführt. Die Bohrkernne konnten so äußerst schonend entnommen und geschützt zur Weiteruntersuchung in die BAW transportiert werden. In der BAW wurden die Bohrkernne ausgelegt und angesprochen. Die Ergebnisse der Radarmessungen wurden mit den Bohrkernnen verglichen.

Um den Einfluss der verschiedenen Injektionsgüter auf die Radarmessung zu bestimmen, wurden Probebauteile mit genau definierten Fehlstellen hergestellt und injiziert. Die an diesen Probebauteilen durchgeführten Radarmessungen wurden zur Kalibrierung der Messungen am Bauteil genutzt.

### 3 Ergebnisse

Die Messungen zum Ursprungszustand ergaben entgegen den Erwartungen eine schwankende Verteilung der Fehlstellen über die Kammerwandblocklänge. Somit kann zwar der Injektionserfolg über den Vergleich der Messungen vor und nach der Injektion für ein Probefeld bewertet werden, ein direkter Vergleich der Injektionsgüter untereinander ist aber nicht möglich. Auch haben sich bereichsweise bindige Ablagerungen in Hohlräumen gezeigt, die bei der Vorerkundung nicht vorgefunden wurden.

Auffällig war der Einfluss des Alters der Probekörper auf die Radarmessung. So veränderten sich die hydraulischen Bindemittel nicht nur über einen Monat, sondern es war noch ein Einfluss über sechs Monate nach der Herstellung feststellbar.

Die bisherigen Erfahrungen werden derzeit zusammengetragen und Optimierungsmöglichkeiten für künftige Injektionen dieser Art diskutiert.

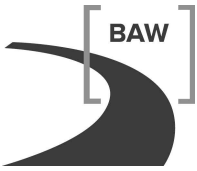


Bild 1: Injizierter Bohrkern (links), Verbund Vorsatzschale-Kernbeton (rechts)

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015: Erstellung des Abschlussberichtes

Laufzeit des Vorhabens: 2006 bis 2015.



## **5 Literatur**

-/-

## **6 Veröffentlichungen**

Eßer, A.; Rubba, U., Patitz, G.; Müller, H. (2009): Ertüchtigung von Schleusenkammerwänden mit Klinkervorsatzschalen durch Injektionen; Tagungsband 1. Kolloquium "Erhaltung von Bauwerken" der TAE Esslingen,

## **Dauerhaftigkeitsbemessung von Wasserbauwerken**

**Netzplan-Nr.:** A39510310240

**Projektleiter:** Dr.-Ing. T. Reschke, Dipl.-Ing. A. Rahimi, Abteilung Bautechnik,  
Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** thorsten.reschke@baw.de, amir.rahimi@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Dauerhaftigkeit neu zu erstellender Betonbauwerke wird nach derzeitigen Regelwerken (DIN EN 206 / DIN 1045-2 / ZTV-W LB 215) deskriptiv durch die Einhaltung von bestimmten, auf Erfahrungswerten beruhenden Mindestanforderungen an die Betonzusammensetzung, -druckfestigkeit und Betondeckung sichergestellt. Eine leistungsbezogene Bewertung nach dem Performance-Konzept, wie bei der Tragwerksbemessung, fehlt. Für eine realistische Abschätzung und Sicherung der Dauerhaftigkeit nach dem Performance-Konzept sind sowohl die relevanten Schädigungsmechanismen (Expositionen) als auch die konkreten Betoneigenschaften (Leistungsfähigkeit des Betons) für den konkreten Anwendungsfall zu berücksichtigen. Seit einigen Jahren wird dieser Problematik „probabilistischer Lebensdauerbemessungsverfahren“ sowohl im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben, Schießl, G. et al. (2011), Gehlen, C., (2000) als auch im Rahmen der europäischen und internationalen Normungsarbeit, *fib* Bulletin 34 (2006), *fib* Model Code (2010), ISO 16204 (2012) nachgegangen. Für den Fall der Depassivierung des Betonstahls infolge Carbonatisierung sowie Eindringen von Chloriden in den Beton wurden bereits entsprechende probabilistische Bemessungsmodelle entwickelt (Gehlen, C. (2000), *fib* Bulletin 34 (2006)). Betrachtungen auf Basis entwickelter Bemessungsmodelle sowie Untersuchungen an Bauwerken weisen darauf hin, dass die nach EN 206 / DIN 1045-2 bzw. ZTV-W LB 215 angestrebten Nutzungsdauern von 50 bzw. 100 Jahren durch die deskriptiven Vorschriften nicht in jedem Fall mit ausreichender Wahrscheinlichkeit erreicht werden (DAfStb, 2008).

Bei der Beurteilung der Restnutzungsdauer bestehender Bauwerke unter Dauerhaftigkeitsaspekten ohne bzw. nach Ausführung von Instandsetzungsmaßnahmen sind derartige deskriptive Ansätze zumeist nicht ausreichend bzw. mangels entsprechender Informationen zu den Baustoffen nicht anwendbar, praxisgeeignete Bemessungsverfahren auf probabilistischer Basis stehen nicht zur Verfügung.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Notwendigkeit, immer älter werdende Bauwerksbestände mit stark limitierten Haushaltsmitteln unterhalten zu müssen, führte in den letzten Jahren zur Entwicklung von Lebensdauer- bzw. Erhaltungsmanagementsystemen (EMS). Auch für die WSV wird derzeit ein EMS erarbeitet. Durch frühzeitiges Erkennen möglicher Schädigungen und zuverlässige Vorhersagen der Zustandsentwicklung soll eine wirtschaftlich optimierte und nachhaltige Bauwerksunterhaltung und -instandsetzung ermöglicht werden. Grundlage dafür sind entsprechende Schadensentwicklungsmodelle, welche im Rahmen des FuE-Vorhabens hinsichtlich wasserbauspezifischer Bedingungen bewertet und ggf. angepasst werden sollen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Es sind Bemessungskonzepte zu erarbeiten, die bei gegebenen Betoneigenschaften eine realistische Bewertung der Nutzungsdauer von Wasserbauwerken ermöglichen. Soweit möglich, sind dabei für die Bewertung der relevanten Betoneigenschaften Performance-Prüfungen zu verwenden. Die Dauerhaftigkeitsbemessung soll neben der Bewertung der "Restnutzungsdauer" bestehender Bauwerke auch die Abschätzung bzw. gezielte Planung der Nutzungsdauer nach Instandsetzungsmaßnahmen ermöglichen.

## 2 Untersuchungsmethoden

Die BAW hat in den letzten Jahren zunächst mehrere universitäre Forschungsprojekte begleitet, mit dem Ziel, entsprechende Bemessungskonzepte unter besonderer Berücksichtigung wasserbauspezifischer Beanspruchungen zu erarbeiten. Zu nennen ist hier insbesondere das DAfStb-Verbundvorhaben „Nachhaltig Bauen mit Beton“, Teilprojekt D „Lebensdauermanagement“, da hier ein Software-Prototyp erarbeitet wurde, welcher vollprobabilistische Modelle impliziert. Damit können realitätsnahe Zustandsprognosen des Bauwerks direkt am dreidimensionalen Bauwerksmodell dargestellt werden. Durch Berücksichtigung von Untersuchungsergebnissen kann die Prognose zudem sukzessiv zugeschärft, durch die Anwendung zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden mögliche Schädigungen bereits frühzeitig erkannt und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden (Schießl et al., 2011).

Aktuell steht seit September 2011 im Rahmen einer Kooperation mit dem Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München die Dauerhaftigkeitsbemessung von Wasserbauwerken für den Fall einer chloridinduzierten Bewehrungskorrosion im Fokus. Dieser Themenbereich wurde bislang im FuE-Vorhaben „Chlorideindringwiderstand von Beton“ bearbeitet, die im Rahmen dieses Vorhabens gewonnenen Erkenntnisse (Gehlen und Fischer, 2007; Gehlen und Osterminski, 2009) wurden übernommen.

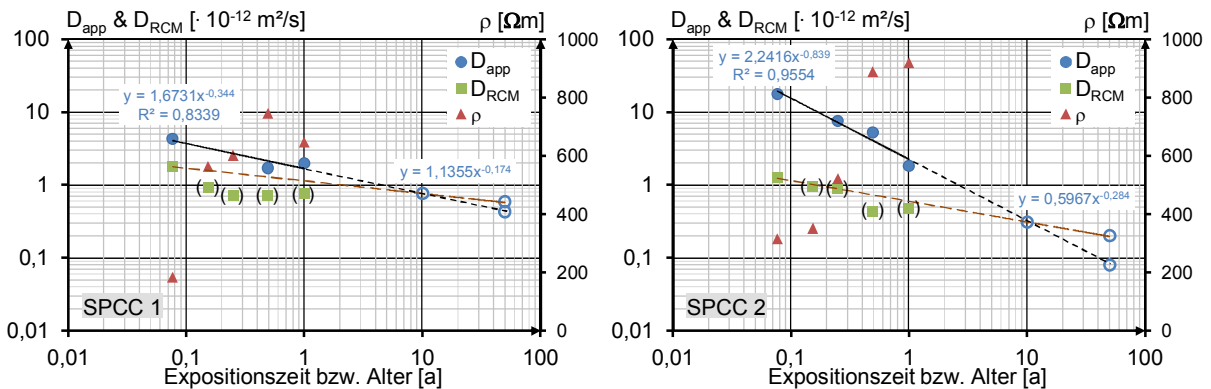
## 3 Ergebnisse

Anhand der erzielten Ergebnisse im Rahmen der Zuverlässigkeitsanalysen zur Überprüfung der deskriptiven Vorgaben der Normung für Neubaumaßnahmen wurden in der Neufassung der ZTV-W LB 215 (2012) entsprechende Anpassungen für die Expositionsclassen XD und XS vorgenommen.

Für die Lebensdauerprognose von instandgesetzten Bauteilen fehlen noch die Beschreibung und die mathematische Formulierung des Chloridtransports im 2-Schicht-System bestehend aus dem alten Beton und dem Instandsetzungsmaterial. Dies wird aktuell durch Laborversuche untersucht.

Weitere Laboruntersuchungen befassen sich mit der Untersuchung des Langzeitverhaltens von Instandsetzungsmaterialien hinsichtlich ihres Chlorideindringwiderstandes. Sechs verschiedene handelsübliche Instandsetzungsmaterialien wurden für die Untersuchungen ausgewählt. Dabei handelt es sich um hydraulisch erhärtende, kunststoffvergütete zementgebundene Gemische; vier Trockenspritzbetone (SPCC) und zwei Werk trockenmörtel (PCC). Die für die Dauerhaftigkeitsabschätzung maßgeblichen Laboruntersuchungen umfassen Schnellchloridmigrationstest (RCM) und Diffusionstest (Einlagerungsversuch). Ziel dieser Untersuchungen ist es, durch geeignete Versuche und Methodik die Leistungsfähigkeit von Instandsetzungsmaterialien, deren Zusammensetzungen in der Regel von den Herstellern nicht offen gelegt werden, beurteilen zu können.

Im Bild 1 sind die ermittelten Ergebnisse der Laborversuche (bis zum Zeitpunkt von einem Jahr) exemplarisch für zwei untersuchte Spritzbetone SPCC1 und SPCC2 dargestellt. Die ermittelten Kennwerte zusammen mit dem im Rahmen dieses Vorhabens entwickelten Ansatz ermöglichen eine Bewertung der Leistungsfähigkeit der untersuchten Materialien (s. Tabelle 1).



**Bild 1:** Zeitliche Entwicklung der ermittelten Materialkennwerte scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient  $D_{app}$ , Chloridmigrationskoeffizient  $D_{RCM}$  und spezifischer Elektrolytwiderstand  $\rho$  (exemplarisch an zwei Spritzbetonen SPCC1 und SPCC2)

Parameter	Ordnung: günstig → ungünstig
$D_{app}(50a)$ <sup>1)</sup> [· 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	PCC I, SPCC 3, SPCC 2, PCC II, SPCC 1 0,082 ..... 0,115 ..... 0,200 ..... 0,320 ..... 0,520

<sup>1)</sup> abgeleiteter  $D_{app}$  nach 50 Jahren Exposition

**Tabelle 1:** Bewertung der untersuchten Instandsetzungsmaterialien durch den Vergleich der ermittelten Kennwerte

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Laboruntersuchungen der o. a. Instandsetzungsmaterialien werden für einen Zeitraum von mindestens zwei Jahren durchgeführt. Die nächsten Laborprüfungen sind für die Zeitpunkte 1,5 Jahre und 2 Jahre vorgesehen. Für endgültige Schlussfolgerungen sind die Ergebnisse weiterer Untersuchungen abzuwarten.

Laufzeit des Vorhabens: 2006 bis 2015.

#### 5 Literatur

DAfStb (2008): Positionspapier des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J.

fib (2006): Bulletin 34: Model Code for Service Life Design, prepared by fib Task Group 5.6. (2006).

fib (2010): Model Code for Concrete Structures (2010).

Gehlen, C. (2000): Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 510. Beuth-Verlag, Berlin.

Gehlen, C., Fischer, C.(2007): Überarbeitung des BAW-Merkblatts Chlorideindringwiderstand von Beton. Forschungsbericht A07/1-1 im Auftrag der BAW, Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart.

Gehlen, C., Osterminski, K. (2009): Zuverlässigkeit Wasserbauwerke – Chlorideindringwiderstand. Forschungsbericht 30-F-0019 im Auftrag der BAW, Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München, November.

ISO 16204 (2010): Durability – Service life design of concrete structures.

Schießl, P., Gehlen, C. et al. (2011): Verbundforschungsvorhaben „Nachhaltig Bauen mit Beton“ Lebenszyklusmanagementsystem zur Nachhaltigkeitsbeurteilung – Teilprojekt D. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 586. Beuth-Verlag, Berlin.

## 6 Veröffentlichungen

- Rahimi, A., Gehlen, C., Reschke, T., Westendarp, A. (2014): Approaches for Modelling the Residual Service Life of Marine Concrete Structures. *International Journal of Corrosion* 1/2014, <http://www.hindawi.com/journals/ijc/2014/432472/abs/>.
- Rahimi, A., Gehlen, C. (2014): Durability Design of Reinforced Concrete Members being Repaired. *fib Commission 5 Seminar on Durability of Concrete Structures*, May 8<sup>th</sup> 2014, Minho – School of Engineering University of Minho.
- Rahimi, A., Gehlen, C., Reschke, T., Westendarp, A. (2014): Efficiency of materials used for repair measures of concrete structures exposed to chlorides. 5<sup>th</sup> International Conference on Concrete Repair – Concrete Solutions, 01.-03. September 2014, Belfast – Queen's University Belfast.
- Rahimi, A., Gehlen, C., Reschke, T., Westendarp, A. (2014): Bewertung der Leistungsfähigkeit von Instandsetzungsmaterialien und der Lebensdauer von instandgesetzten Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung. In: *Beton-Kalender 2015*, Kapitel VI. Ernst & Sohn, Berlin.

**Messverfahren Hydratationswärme****Netzplan-Nr.:** A39510370004**Projektleiter:** Dr.-Ing. F. Spörel, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)**E-Mail:** frank.spoerel@baw.de**1 Problemstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Entwicklung der Hydratationswärme im Beton ist zur Erfassung der daraus resultierenden Zwangsspannungen insbesondere in massigen Bauteilen von Bedeutung. Daher kommt den Messverfahren zur Erfassung der Hydratationswärmeentwicklung und deren Übertragbarkeit eine besondere Bedeutung zu.

In DIN EN 196-8 verankert ist das Verfahren der Lösungskalorimetrie, bei dem an einem unhydratisierten Zement und an einem für 7 Tage unter genormten Bedingungen hydratisierten Zement die Lösungswärme in einer Säuremischung bestimmt wird. Aus der Differenz wird die Hydratationswärme berechnet. Während der Lagerungsdauer wird die Temperatur konstant gehalten. Die ermittelte Hydratationswärme wird zur Beschreibung der Eigenschaft LH bzw. VLH eines Zementes verwendet. In der Regel erfolgt die Ermittlung der Hydratationswärmeentwicklung im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle nur an Zementen mit der Eigenschaft LH bzw. VLH.

Zunehmende Verbreitung findet derzeit das ebenfalls unter nahezu isothermen Bedingungen prüfende Verfahren der isothermen Wärmeflusskalorimetrie. Bei diesem Verfahren erfolgt eine kontinuierliche Aufzeichnung der Wärmefreisetzung. In der Zementindustrie wird dieses Verfahren zunehmend häufiger eingesetzt. Derzeit laufen Bestrebungen, dieses Verfahren zukünftig auch normativ zu verankern.

Die Bestimmung der Hydratationswärme im teiladiabatischen Versuch nach DIN EN 196-9 (Thermosflaschenversuch) ist in Deutschland nicht weit verbreitet, wird aber beispielsweise im Rahmen von Zulassungsverfahren des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) für allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen von Massenbetonen eingesetzt. Die Temperaturentwicklung eines Mörtels wird kontinuierlich gegen eine bereits erhärtete Mörtelprobe aufgezeichnet und daraus die freigesetzte Hydratationswärme ermittelt. Nach DIN EN 196-9 ergibt sich nach einer Prüfdauer von 41 Stunden die beste Korrelation zu den Ergebnissen der Lösungskalorimetrie nach DIN EN 196-8 nach 7 Tagen. Ergänzend können in einem etwas abgewandelten Thermosflaschenversuch auch Betone bis zu einem Größtkorn von 32 mm untersucht werden. Aufgrund der durch die teiladiabatischen Verhältnisse entstehenden geringeren Temperaturen im Vergleich zur adiabatischen Messung handelt es sich hier um eine untere Abschätzung der adiabatischen Wärmefreisetzung. Eine rechnerische Abschätzung der adiabatischen Temperaturentwicklung ist jedoch möglich.

Die BAW und verschiedene andere Institutionen arbeiten mit adiabatischen Betonkalorimetern. In einem adiabatischen Betonkalorimeter wird die adiabatische Temperaturerhöhung des Beton direkt ermittelt. Schwierigkeiten bestehen in der Sicherstellung der adiabatischen Randbedingungen.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Hydratationswärmeentwicklung ist im Bereich der WSV bei dem Großteil der Bauvorhaben von Interesse, da häufig massige Bauteile vorhanden sind. Durch die Anwendung alternativer Prüfverfahren zur Hydratationswärmebestimmung mit geringerem Aufwand als bei den Kalorimeterversuchen oder großformatigen Betonblöcken wird auch im Hinblick auf die Anwendung von Berechnungsverfahren zur Abschätzung der Hydratationswärme ein Erkenntnisgewinn erwartet. Die Bewertbarkeit von mit unterschiedlichen Prüfmethoden ermittelten Temperaturerhöhungen wird verbessert. Ausgangsstoffuntersuchungen zur Optimierung der Freisetzung von Hydratationswärme könnten bei Eignung der Verfahren im Vorfeld von Baumaßnahmen mit deutlich reduziertem Aufwand durchgeführt werden, um eine Optimierung der Betonzusammensetzung in Bezug auf die Hydratationswärmeentwicklung zu erreichen.

### 1.3 Untersuchungsziel

Ziel der Untersuchungen ist es, über ein vergleichendes Prüfprogramm Erkenntnisse zu gewinnen, wie die Messergebnisse der einzelnen Prüfverfahren zur Messung der Hydratationswärme korrelieren, und wie eine Übertragung auf die bei der BAW durchgeführten Kalorimeterversuche bzw. der Messungen am Betonblock von 2 m x 2 m x 2 m möglich ist. So können die mit unterschiedlichen Messverfahren bestimmten Ergebnisse besser auf deren Aussagekraft im Hinblick auf die Hydratationswärmeentwicklung im Bauteil eingeschätzt werden. Ebenfalls von Interesse sind in diesem Zusammenhang Erkenntnisse, für welche Anwendungen die einzelnen Prüfverfahren alternativ oder ergänzend zu den Kalorimetermessungen eingesetzt werden können und ob bzw. mit welchen Grenzen eine Verwendung der Ergebnisse zur Berechnung der Hydratationswärme im Bauteil möglich ist. Die Ergebnisse der Auswertung sollen weiterhin als Entscheidungshilfe über eine evtl. Anschaffung einer geeigneten Messeinrichtung bei der BAW dienen. Ergänzend zu den teiladiabatischen Verfahren wird ein adiabatisches Betonkalorimeter entwickelt und gebaut. Hier erfolgt eine Zusammenarbeit mit dem KIT.

### 2 Untersuchungsmethoden

Die Erkenntnisgewinne sollen über eine Literatursichtung und die Durchführung von Messungen der Hydratationswärme mit den verschiedenen Messverfahren erfolgen. Da die erforderlichen Messeinrichtungen bei der BAW nicht vorhanden sind, werden die Prüfungen extern vergeben. Dabei handelt es sich um die

- Hydratationswärmebestimmung mit der Lösungskalorimetrie nach DIN EN 196-8
- Hydratationswärmebestimmung mit der isothermen Wärmeflusskalorimetrie
- Hydratationswärmebestimmung mit dem teiladiabatischen Verfahren nach DIN EN 196-9 an einem Normmörtel und einer aus einem Vergleichsbeton abgeleiteten Mörtelzusammensetzung.
- Hydratationswärmebestimmung mit dem teiladiabatischen Verfahren am Beton

Die Ausgangsstoffe werden so ausgewählt, dass eine Anbindung der Ergebnisse an Messungen, die bei der BAW mit dem adiabatischen Kalorimeter durchgeführt wurden, möglich ist. Für die Auswertung und den Vergleich mit den adiabatischen Kalorimetermessungen ist eine Umrechnung der Messdaten der teiladiabatischen Versuche erforderlich. Anschließend erfolgt eine Bewertung der einzelnen Messverfahren im Hinblick auf deren Einsatzmöglichkeit zur Abschätzung der Hydratationswärme in Bauteilen.

### 3 Ergebnisse

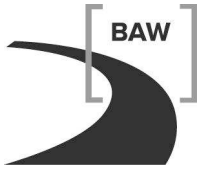
Bislang wurden fünf Betonrezepturen, die auch bei aktuellen Baumaßnahmen innerhalb der WSV zum Einsatz kommen, untersucht. Erste Ergebnisse deuten an, dass prinzipiell mit teiladiabatischen Betonversuchen eine eher untere Abschätzung der adiabatischen Wärmeentwicklung erfolgen kann. Weiterhin deuten die ersten Untersuchungen an, dass aus Ergebnissen isothermer Prüfverfahren berechnete Wärmeentwicklungen die adiabatische Temperaturentwicklung teilweise deutlich unterschätzen. Die Entwicklung und der Bau eines neuen adiabatischen Betonkalorimeters wurden in 2014 fast abgeschlossen.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015: Begleitend zu jeweils in der BAW durchgeführten Kontrollprüfungen werden die gleichen Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzungen den beschriebenen Prüfungen unterzogen. Anschließend folgen eine zusammenfassende Bewertung der einzelnen Prüfmethode sowie ein Ausblick auf die Anwendungsmöglichkeiten rechnerischer Verfahren zur Bestimmung der quasiadiabatischen Temperaturerhöhung. Eine Zusammenarbeit mit verschiedenen Forschungseinrichtungen soll die zukünftige Vorgehensweise absichern. Weiterhin wird die Entwicklung und der Bau des neuen adiabatischen Betonkalorimeters abgeschlossen und das Kalorimeter wird in Betrieb genommen.

Laufzeit des Vorhabens: 2008 bis 2015.





**5 Literatur**

-/-

**6 Veröffentlichungen**

-/-

## **Verwendung von Acrylatgelen und gelartigen Produkten für Instandsetzungsmaßnahmen an Massivbauwerken im Verkehrswasserbau**

**Netzplan-Nr.:** A39510370005

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. M. Maisner, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** matthias.maisner@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

Die Anwendung von Acrylatgelen für die Injektion von Rissen und Hohlräumen wurde und wird im Rahmen von Forschungsvorhaben hinterfragt und im Hinblick auf die Korrosionsgefährdung der Bewehrung und sonstiger metallischer Einbauteile kritisch bewertet. In einer Forschungsstudie der MFPA Leipzig wird für die nachträgliche Bewegungsfugenabdichtung u. a. die Verwendung von Acrylatgelen empfohlen. Allerdings wurden bei dieser Studie die besonderen Randbedingungen der WSV wie die Gefahr der Gewässerverschmutzung oder die sehr langen Nutzungsdauern der Bauwerke nur bedingt hinterfragt.

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Acrylatgele bieten interessante Potentiale für das Füllen von Rissen und Hohlräumen in Betonbauteilen und für die Ertüchtigung von Bewegungsfugen. Auf der anderen Seite müssen aber auch die Risiken, die mit der Anwendung solcher Materialien verbunden sein können, berücksichtigt werden. Durch die Anwendung von Acrylatgelen dürfen keinesfalls Schäden an Bestandteilen von Massivbauwerken, wie z. B. Bewehrung oder Fugenbänder, aber auch keine Umweltbeeinträchtigungen, initiiert werden. Im Falle eines Kontaktes der Acrylatgele mit der Betonbewehrung und Einbauteilen muss eine mögliche Korrosionsgefährdung hinterfragt werden. Aus Studien ist bekannt, dass der Aspekt der Dauerhaftigkeit der Acrylatgele ebenfalls hinterfragt werden muss.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Acrylatgele könnten bei Instandsetzungsmaßnahmen für das Füllen von Rissen und Hohlräumen in Betonbauteilen oder für die Ertüchtigung von Bewegungsfugen eingesetzt werden und hier deutlich aufwendigere Instandsetzungslösungen überflüssig machen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Im Rahmen des FuE-Vorhabens soll, unterschieden für die Anwendungsbereiche "Injektion von Rissen und Hohlräumen in Betonbauteilen" und "Ertüchtigung der Bewegungsfugen von Wasserbauwerken" die Bewertung der grundsätzlichen Eignung von Acrylatgelen für die Anwendung an Bauwerken der WSV hinterfragt werden. Ggf. sollen Kriterien für die Anwendung von Acrylatgelen für die o. g. Anwendungsbereiche erstellt werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Teil A:

Erarbeitung einer Marktübersicht zu den für Rissinjektions- bzw. Fugeninstandsetzungsmaßnahmen eingesetzten Acrylatgelen und Verfahren. Bewertung des Gefährdungspotentials der Ausgangsstoffe und der ausreagierten Stoffe in Zusammenarbeit mit der BfG. Erstellung einer Übersicht zu bereits ausgeführten Maßnahmen innerhalb der WSV. Einholung von Erfahrungen mit vergleichbaren Maßnahmen außerhalb der WSV. Bewertung der grundsätzlichen Eignung von Acrylatgelen für die genannten Anwendungsbereiche.

Teil B:

Falls die Untersuchungen im Teil A eine grundsätzliche Eignung ergeben, sollen in einem Teil B Anwendungskriterien für die genannten Anwendungsbereiche (Erforderliche Leistungsmerkmale und Qualitätssicherung Baustoffe; Anforderungen an Bauverfahren; Qualitätssicherung Bauausführung etc.) erarbeitet werden.

### 3 Ergebnisse

In Zusammenarbeit mit der Hochschule Mannheim wurde eine Masterarbeit zum Thema "Untersuchungen an Acrylatgelen in Betonmodellen mit Dichtelementen" erstellt. Im Rahmen der Masterarbeit wurden zunächst die physikalischen Eigenschaften von drei handelsüblichen Acrylatgelen untersucht. Später wurde noch ein Produkt mit Polymersionskomponente ausgewählt. Die ausgewählten Produkte wurden bereits teilweise pilotartig für die Instandsetzung bei Maßnahmen der WSV eingesetzt. Im nachfolgenden werden diese Gele mit A, B, C und D bezeichnet. Für die Instandsetzung von Bewegungsfugen in Verkehrswasserbauwerken wurden bislang nur die Gele A und C eingesetzt. Das nachfolgende Bild 1 zeigt die Kontaktreaktion zwischen Gel B und einem Bewehrungsseisen nach 3 Monaten Lagerung des Betonmodells. Mit Hilfe der Energiedispersionsanalyse (EDX) wurde festgestellt, dass die Fe-Ionen bis 23 mm Tiefe in das Gel diffundiert sind.

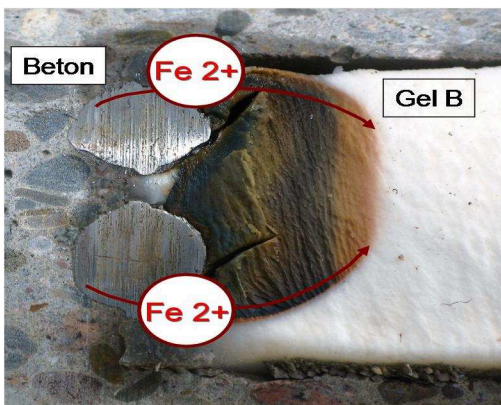


Bild 1: Bohrkerne, Gel B und Korrosionsspuren im Gel

Bei Gel A wurden dagegen erst nach 15monatiger Lagerung Korrosionsspuren in 18 mm Tiefe festgestellt. Anhand der Bohrkernentnahmen wurde eine Wechselreaktion von Acrylatgelen mit den Dichtelementen „beschichtete Fugenbleche“ und „Fugenbänder“ festgestellt. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass alle drei Gele als korrosionsfördernd bzw. als Korrosionsverursacher einzuschätzen sind. Acrylatgele werden als Alternative für die Füllung von Hohlräumen wie Kiesnester angesehen. Daher stellt die Lollipop-Probekörper-Variante "Künstliches Kiesnest" eine sinnvolle "Worst-Case" Betrachtung dar. Bild 2 zeigt die Diffusion im Gel B und die angerostete Arbeitselektrode.

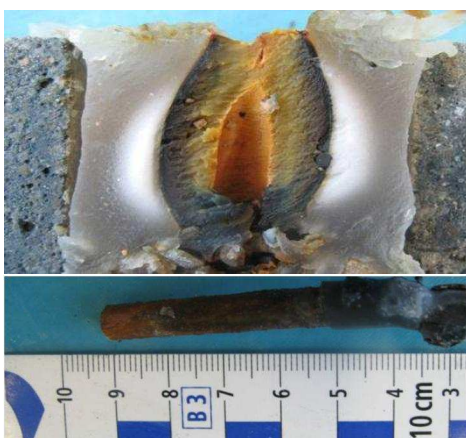


Bild 2: Lollipop-Probekörper künstliches Kiesnest Gel B (oben) und gerostete Arbeitselektrode (unten).

Die gemessenen Stromdichten und die visuellen Untersuchungen der Probekörper und Arbeitselektroden zeigen, dass eine Korrosion durch Acrylatgele nicht auszuschließen ist. Aus Bild 3 ist die Tempe-

raturentwicklung der Gele während der exothermen Aushärtung mit einem Volumen von 10 l zu ersehen. Im Falle der Fugeneinstandsetzung bei älteren Bauwerken muss berücksichtigt werden, dass vielfach thermoplastische Dichtelemente vorhanden sind, die nicht dem heutigen Stand der Technik entsprechen. Daher ist bei den festgestellten Temperaturen eine Veränderung der Materialeigenschaften dieser Dichtelemente nicht auszuschließen.

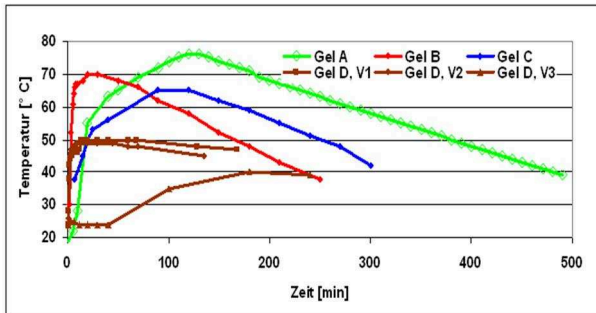


Bild 3: Temperaturanstieg bei der Aushärtung der Gele bei Anmischvolumina von ca. 10 bis 13 l

Mit der Bestimmung des spezifischen Widerstandes kann die Möglichkeit der Korrosion von Bewehrungsstahl bei Kontakt mit Acrylatgelen abgeschätzt werden. Hierzu wurden Kunststoffbehälter mit Gel ausgefüllt. Als Elektroden dienten Edelstahlgitter. Im Nasszustand zeigten die drei Gele eine gute Leitfähigkeit. Die Zugeigenschaften der Gele sind stark abhängig vom Wassergehalt und der Prüftemperatur. So zeigt Gel C beispielsweise bei Raumtemperatur nach 12 Tagen Trocknung an der Luft eine mittlere Bruchfestigkeit von 5,9 MPa bei einer mittleren Bruchdehnung von 6 %. Abschließend bleibt festzustellen, dass die bisherigen Untersuchungen der Gele gezeigt haben, dass Acrylatgele keineswegs uneingeschränkt für eine Fugeneinstandsetzung anwendbar sind. Für die Gele C und D wurden in Anlehnung an die bisherigen Untersuchungen Betonmodelle in 2013 hergestellt und nach 3monatiger Lagerungszeit Bohrkern entnommen. Gel C zeigt in Kontakt mit Bewehrungsstahl Korrosionsspuren. Zur Untersuchung der Kontaktreaktionen mit Dichtelementen wurden nach einjähriger Lagerungszeit Bohrkern aus dem Betonmodell entnommen und untersucht. Besonders kritisch war die Kontaktreaktion mit PVC.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015 Beendigung des Projektes.

Laufzeit des Vorhabens: 2008 bis 2015.

#### 5 Literatur

-/-

#### 6 Veröffentlichungen

Maisner, M.; Eßer, A.; Kwenjeu, A.; Westendarp, A.; Schnellenbach-Held, M. (2012): Quellfähige Acrylatgele – Eine Instandsetzungsalternative für Bewegungsfugen in Verkehrswasserbauwerken?, Beton- und Stahlbetonbau 107, 2012 Heft 9, S. 601 – 612

Maisner, M.; Eßer, Westendarp, A.; Schnellenbach-Held, M. (2013): Quellfähige Acrylatgele in Kontakt mit Dichtelementen/Stahl, TAE Tagungshandbuch 2013, Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, S. 549 – 559

## **Ertüchtigung der Bewegungsfugen von Massivbauwerken im Verkehrswasserbau**

**Netzplan-Nr.:** A39510370006

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. M. Maisner, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** matthias.maisner@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Ertüchtigung undichter Bewegungsfugenbereiche ist bereits heute ein wichtiges Thema für die WSV. In Anbetracht der voraussichtlich weiter zunehmenden Anzahl schadhafter Fugen sollen Instandsetzungsvarianten für verschiedene Randbedingungen erarbeitet werden.

Für die Ertüchtigung von Bewegungsfugen werden in der WSV bereits verschiedene Materialien und Verfahren eingesetzt. Hierbei handelt es sich in erster Linie um nachträglich an der schleusenkamerseitigen Wandoberfläche aufgesetzte Fugenbänder (Schleusen Uelzen 1, Leerstetten und Eibach) oder die Injektion von Bewegungsfugen mit Produkten auf der Basis von PUR und Acrylatgelen (diverse Schleusen am MDK). Die bisherigen nachträglich aufgesetzten Fugenbandkonstruktionen sind zeit- und kostenaufwendig. PUR und Acrylatgele müssen unter technischen und umweltrelevanten Aspekten kritisch hinterfragt werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Zahl schadhafter Bewegungsfugen wird angesichts der Altersstruktur des Baubestandes in den kommenden Jahren voraussichtlich wachsen. Die WSV benötigt Lösungen für die Ertüchtigung solcher schadhafter Bewegungsfugen, um unplanmäßige Wasserdurchtritte und die hiermit verbundenen Risiken (z. B. Bodenumlagerungen) zielsicher unterbinden zu können.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel dieses Vorhabens ist es, systematisch für verschiedene Randbedingungen (u. a. Größenordnung der Fugenweitenänderung, Zugänglichkeit der instand zu setzenden Bewegungsfuge, dauernde oder temporäre Wasserbeaufschlagung, Umweltaspekte, Wasserdruck und Temperatur) geeignete Instandsetzungsverfahren und Instandsetzungsmaterialien zu definieren und die zugehörigen Anforderungen an Bauverfahren und Baustoffe festzulegen. Erfahrungen mit bereits realisierten Instandsetzungsmaßnahmen sollen hierbei berücksichtigt werden. Der WSV sollen Informationen an die Hand gegeben werden, mit deren Hilfe sie unter technischen, wirtschaftlichen und umweltrelevanten Aspekten optimale Lösungen für den jeweiligen Anwendungsfall auswählen kann.

### **2 Untersuchungsmethoden**

- Zusammenstellung und Kategorisierung typischer Bewegungsfugenausbildungen und Fugenwerkstoffe an Bauwerken der WSV
- Zusammenstellung der Schäden und Ursachen für defekte Bewegungsfugen
- Zusammenstellung und Kategorisierung der Anforderungen an Bewegungsfugen
- Erstellung einer Übersicht über bereits ausgeführte Ertüchtigungsmaßnahmen und deren Nachhaltigkeit
- Erarbeitung von Ertüchtigungslösungen für schadhafte Bewegungsfugen in Abhängigkeit bestimmter Randbedingungen (u. a. Fugenweitenänderung, Zugänglichkeit, dauernde oder temporäre Wasserbeaufschlagung, Umweltaspekte, Wasserdruck und Temperatur)
- Untersuchung der Fugeninstandsetzung-Variante "Überbohren der Fugen" mit einem modifizierten SBK an einer Fuge im Modellmaßstab.

Die im parallel zu bearbeitenden FuE-Vorhaben "Einsatz von Acrylatgelen und gelartigen Produkten für Instandsetzungsmaßnahmen an Massivbauwerken im Verkehrswasserbau" gewonnenen Erkenntnisse sollen in das vorliegende FuE-Vorhaben einfließen.

### 3 Ergebnisse

In Zusammenarbeit mit dem WSA Aschaffenburg wurde 2010 bei der Doppelschleuse Kleinostheim eine Dehnungsfuge im Längskanal und eine Fuge der Schleusenammer mit einem stahlseilbewehrten Dichtungsband (SBK) ausgerüstet. Bei der Ausbildung der Flanschkonstruktion war es von Vorteil, dass im Bereich der Richtungsänderung Sohle/Kammerwand auf die Flanschkonstruktion verzichtet werden kann. Für die dauerhafte Klemmung des SBK wurden Tellerfedern eingesetzt. Diese Konstruktionsanordnung wurde zuvor im Rahmen einer Diplomarbeit untersucht. Die ersten Beobachtungen zeigen, dass diese Instandsetzungsvariante eine Ertüchtigungsalternative für Fugen mit Richtungsänderungen in der Abdichtungsebene darstellt. Für die Abdichtung des Längskanals war es entscheidend, dass die Abdichtungsebene endlos hergestellt werden konnte. Die bisherigen Instandsetzungsmethoden haben den Nachteil, dass für die gesamte Maßnahme zur Fugeninstandsetzung eine Trockenlegung mit entsprechender Schifffahrtssperre erforderlich ist. Im Rahmen einer Bachelorthesis im Studiengang Bauingenieurwesen der Hochschule Karlsruhe wurde unter Betreuung der BAW die Methode "Überbohren der Fuge in Kombination mit einer Klemmkonstruktion" unter bestimmten Randbedingungen untersucht. Die bisherigen Ergebnisse zeigen eine Option für eine Anwendung innerhalb eines Pilotprojektes. Das "Überbohren der Fuge" hat den Vorteil, dass das vertikale Abteufen der Bohrung von der Plattform bis auf Unterwasserhöhe unter Schleusenbetrieb erfolgen kann.

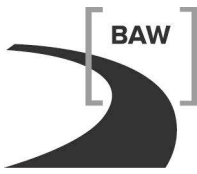


Bild 1: Betonmodell für die Fugensimulation in der BAW

In 2014 wurden weitere Untersuchungen an dem Betonmodell durchgeführt. Aufgrund der Ergebnisse erfolgten erste Planungen für eine Pilotanwendung der Variante "Überbohren der Fuge in Kombination mit einer Klemmkonstruktion".

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015: Durchführung eines Pilotprojektes zu der Variante "Überbohren der Fugen" an einem Schleusenbauwerk unter Teilbetrieb, mit einer Bohrfirma bei der hinter der bisherigen Abdichtungsebene der Fugenspalt überbohrt wird und die Bohrung bis auf die Höhe der Schleusensohle läuft. In die Bohrung wird ein modifiziertes SBK einbetoniert. Im Bereich der Sohle wird das SBK geklemmt. Weitere Erarbeitung von Ertüchtigungslösungen für schadhafte Bewegungsfugen in Abhängigkeit bestimmter Randbedingungen (u. a. Fugenweitenänderung, Zugänglichkeit, dauernde oder temporäre Wasserbeaufschlagung, Umweltaspekte, Wasserdruck und Temperatur).



Laufzeit des Vorhabens: 2008 bis 2015.

## **5 Literatur**

-/-

## **6 Veröffentlichungen**

Maisner, M.; Becker, H. (2013): Fugeninstandsetzung mit einem stahlseilbewehrten Klemmfugenband, Tagungsband BAW Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, Karlsruhe 2013

## **Betone für Verkehrswasserbauwerke mit Hydroabrasionsbeanspruchung**

**Netzplan-Nr.:** A39510370008

**Projektleiter:** Dr.-Ing. F. Spörel, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** frank.spoerel@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Im Bereich des Verkehrswasserbaus werden Betonoberflächen durch Hydroabrasion in unterschiedlicher Ausprägung beansprucht (Tosbecken, Wehrrücken, Sparbeckenzuläufe, Schleusensohlen, Schleusenkammerwände). Ein Verschleiß der Betonoberflächen erfolgt insbesondere durch die im Wasser mitgeführten Feststoffe, die eine kombinierte schleifende und stoßende Beanspruchung auf die Betonoberflächen ausüben können. Der Grad der Beanspruchung wird unter anderem durch die Fließgeschwindigkeit des Wassers und durch Anteil, Härte, Form und Größe der Feststoffe im Wasser beeinflusst. Auf europäischer Ebene wird der Verschleißwiderstand im Regelwerk der EN 206-1 nicht gesondert behandelt. Im nationalen Anwendungsdokument der DIN 1045-2 wird zur Beschreibung der Intensität der mechanischen Verschleißbeanspruchung eine Expositionsklasseneinteilung XM1 bis XM3 vorgenommen. Diese wurde bei der Erarbeitung der ZTV-W LB 215 bzw. 219 übernommen. Inwiefern die im Wesentlichen aus Verkehr herrührende Expositionsklassensystematik der DIN 1045-2 auch die Hydroabrasion angemessen beschreibt, ist ungewiss. Eine Überprüfung und ggf. Anpassung der Regelungen wäre daher erforderlich.

Auch auf der Widerstandsseite, die durch den Beton beschrieben wird, sind noch viele Fragen offen, beispielsweise inwiefern die deskriptiven Regelungen der DIN 1045-2 zur Sicherstellung eines ausreichenden Widerstandes gegenüber Verschleiß durch Hydroabrasion angemessen sind. Der Betonoberfläche kommt eine wichtige Bedeutung zu, da die Beanspruchung stets von der Oberfläche her stattfindet.

Derzeit existiert kein standardisiertes Prüfverfahren mit festgeschriebenen Abnahmekriterien, welches diese kombinierte Beanspruchung zufrieden stellend abbilden kann. Aussichtsreiche Untersuchungsmethoden basieren derzeit auf der Verschleißprüfmaschine nach Bania (Bania, 1989). Weiterentwicklungen dieser Prüfeinrichtung werden in (Haroske, 1998), (Vogel, Müller, 2009) beschrieben. In der BAW wurde in der Vergangenheit die Unterwassermethode nach ASTM C1138M zur Untersuchung des Widerstands gegenüber Hydroabrasion verwendet. In (Helbig, Horlacher, 2007) wird auf Betonuntersuchungen mit einer Versuchseinrichtung in Anlehnung an das Prüfgerät zur Bestimmung der Abriebbeständigkeit von Geotextilien nach RPG (BAW, 1994) verwiesen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Hydroabrasion ist eine Beanspruchung des Betons, die wesentlich im Verkehrswasserbau auftreten kann. Bei Bauwerken wie beispielsweise Tosbecken oder Wehrrücken, die einer solchen Beanspruchung ausgesetzt sind, ist es daher von zentraler Bedeutung, dort Betone oder Betonersatzsysteme einzusetzen, die der Beanspruchung einen ausreichenden Widerstand entgegensetzen. Aufwendige Instandsetzungen derartiger Bauteile sollen damit künftig möglichst vermieden bzw. erforderliche Instandsetzungsmaßnahmen dauerhaft gegenüber dieser Beanspruchung ausgeführt werden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Die Untersuchungen verfolgen drei wesentliche Ziele hinsichtlich der Beschreibung der Einwirkungs- und Widerstandsseite für den Bereich der Hydroabrasion:

- a) Erarbeitung einer Klassifizierung analog zur Expositionsklassensystematik für die Hydroabrasionsbeanspruchung in Zusammenarbeit mit der TU Dresden.
  - Berücksichtigung vorliegender Erfahrungen der WSV
  - Durchführung von 3D-hydrodynamische Simulationen
  - Definition von Abrasionsregimen für bestimmte Bauteilgruppen



- Ableitung von Hydroabrasionsklassen
- b) Bewertung von Performance-Prüfverfahren hinsichtlich deren Eignung zur Beurteilung wasserbau-relevanter Schädigungsmechanismen durch Hydroabrasion
- c) Erarbeitung von Anforderungen an Betonausgangsstoffe und Betonzusammensetzungen zur Sicherstellung eines hinreichenden Widerstandes gegenüber Hydroabrasion

## 2 Untersuchungsmethoden

Die Erkenntnisgewinne sollen über eine Literatursichtung, theoretische Betrachtungen sowie Bauwerks- und Laboruntersuchungen gewonnen werden. Im Labormaßstab werden drei für die Beanspruchung aus Hydroabrasion geeignete Prüfverfahren zur Bewertung des Betonwiderstandes herangezogen. Begleitet werden die Untersuchungen durch anerkannte Experten auf dem Gebiet der Hydroabrasion.

## 3 Ergebnisse

Die Erarbeitung von Schritt a) erfolgt derzeit mit einem Vorlauf zu den Schritten b) und c) in Zusammenarbeit mit der TU Dresden, Institut für Wasserbau. Erste hydroabrasionsbedingte Schäden an Bauwerken der WSV wurden in die Betrachtungen aufgenommen und 3D-hydrodynamische Simulationen der Fließverhältnisse durchgeführt. Erste Ansätze zur Klassifizierung der Beanspruchung wurden erarbeitet. Weiterhin wurde eine Betreuergruppe eingerichtet, welche aus Experten auf dem Gebiet der Hydroabrasion besteht, und die das Projekt fachlich begleitet.

Ende 2014 wurden erste Vorschläge für eine Klassifizierung der Hydroabrasionsbeanspruchung erarbeitet, welche nun in einem nächsten Schritt diskutiert werden und dann in einem Abschlussbericht zusammengefasst werden.

Zur Erarbeitung der Untersuchungsziele wurde ein Untersuchungskonzept erarbeitet, in welchem die einzelnen Teilarbeitsschritte herausgearbeitet wurden. Aufbauend auf konzeptionellen Vorbetrachtungen sollen die Hauptuntersuchungen durchgeführt werden. In einem ersten Schritt wurden Untersuchungen verschiedener Gesteinskörnungen im Hinblick auf deren Verschleißwiderstand begonnen. Es wurden der Los-Angeles-Test und der Micro-Deval-Test durchgeführt und verschiedene Gesteinskörnungen, welche Anwendung bei Projekten der WSV finden, untersucht. Diese Voruntersuchungen dienen dazu, repräsentative Streuungen verschleißrelevanter Eigenschaften von üblichen Gesteinskörnungen zu erfassen, um eine gezielte Auswahl der Gesteinskörnungseigenschaften für die späteren Betoneigenschaften vornehmen zu können.

## 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2015: Ableitung von Hydroabrasionsklassen analog zur Expositionsklassensystematik, Übertragung der Hydroabrasionsklassen, Versuchsparameter für die Laborversuche, Festlegung von Betonzusammensetzungen und der Versuchs- und Auswerteparameter für die Vorversuche, Durchführung, Auswertung und Bewertung der Vorversuche; Festlegung der Prüfmethode sowie Betonzusammensetzungen für die Hauptversuche, Durchführung der Hauptversuche
- 2016: Auswertung und Bewertung der Hauptversuche
- 2017: Abschlussbericht

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2017.

## 5 Literatur

- Vogel, M., Müller, H. S. (2009): Hydroabrasivverschleiß bei wasserbaulichen Anlagen. Karlsruhe, Hamburg, Ilmenau: Bundesanstalt für Wasserbau. Tagungsband BAW Kolloquium der Abteilung Bautechnik: Baustoffe und Bauausführung im Verkehrswasserbau, 2009
- Haroske, G. (1998): Beitrag zum Hydroabrasionsverschleiß von Betonoberflächen. Dissertation Universität Rostock, 1998

- Bania, A. (1989): Bestimmung des Abriebs und der Erosion von Betonen mittels eines Gesteinstoff-Wassergemisches. Dissertation Technische Hochschule Wismar, 1989
- ASTM C 1138M-05 (2010), Standard Test Method for Abrasion resistance of Concrete (Underwater Method) – ASTM C 1138M-05 (Reapproved 2010)
- Helbig, U.; Horlacher, H.-B. (2007): Ein Ansatz zur versuchstechnischen Simulation und Übertragbarkeit der Hydroabrasion strömungsbeanspruchter Betonoberflächen im Wasserbau. Bautechnik, Band 84, Heft 9, S. 641-645
- BAW (1994): Richtlinien für die Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau (RPG). Bundesanstalt für Wasserbau, 1994

## **6 Veröffentlichungen**

- Spörel, F. (2012): Hydroabrasion von Beton im Verkehrswasserbau – Einwirkung und Betonwiderstand. Tagungsband 35. Dresdner Wasserbaukolloquium 2012, Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 47, S. 77-83

## **Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen**

**Netzplan-Nr.:** A39510370009

**Projektleiter:** Dr.-Ing. T. Reschke, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** thorsten.reschke@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Bei Wasserbauwerken aus Beton sind aufgrund der i.d.R. massigen Bauteile und der Durchfeuchtung optimale Reaktionsbedingungen für eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) gegeben. Sofern die verwendete Gesteinskörnung alkaliempfindliche Bestandteile enthält, kommt es bei erhöhten Alkaligehalten im Beton (u. a. auch durch Alkalizufuhr von außen über Tausalze oder Meerwasser) zu Treibreaktionen mit der Folge von Rissen und Festigkeitsverlusten. Da mit dem bestehenden Regelwerk alkaliempfindliche Bestandteile nicht immer sicher erkannt und bewertet werden können, kam es in jüngerer Zeit auch bei Wasserbauwerken zu Schäden infolge AKR. Insbesondere für langsam reagierende Gesteine („slow-late-Gesteine“) sind neue bzw. modifizierte Prüfverfahren erforderlich, da die bislang angewendeten Schnellprüfverfahren entsprechende Schadensmechanismen nicht abbilden und die Untersuchungsdauer der üblichen Betonprüfungen („Nebelkammerversuch“) offenbar nicht ausreicht.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Nur durch eine sichere Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen im Vorfeld von Bau- und Instandsetzungsmaßnahmen sowie darauf abgestimmte Verwendungsregeln kann die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken gewährleistet werden. Nutzungseinschränkungen und Instandsetzungen bzw. der Ersatzneubau AKR-geschädigter Betonbauwerke können dann entfallen. Gegenüber der bisherigen Vorgehensweise kann zudem der im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit oft nachteilige und möglicherweise ungerechtfertigte Austausch örtlich verfügbarer, aber nicht sicher bewertbarer Gesteinskörnungen vermieden werden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Um zukünftig AKR-Schäden an Betonbauwerken zu vermeiden und Gesteinskörnungen wirtschaftlich einzusetzen, sind Verfahren für eine sichere Bewertung der Alkaliempfindlichkeit bislang nicht sicher bewertbarer Gesteinskörnungen zu entwickeln bzw. zu modifizieren sowie Verwendungsregeln zu erarbeiten, welche die Randbedingungen und die Nutzungsdauer von Verkehrswasserbauwerken berücksichtigen.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Durch vergleichende Untersuchungen mit Betonprüfungen soll die Eignung bestehender und neu entwickelter Schnellprüfverfahren für verschiedene Gesteinskörnungen bewertet sowie eine Entwicklung bzw. Modifikation der Verfahren abgeleitet werden. Des Weiteren soll ein in den letzten Jahren entwickeltes Performance-Prüfverfahren, welches eine nachträgliche Alkalizufuhr berücksichtigt, an die spezifischen Beanspruchungen im Wasserbau angepasst und ebenfalls einbezogen werden.

Als Gesteinskörnungen sollen verschiedene bislang nicht sicher bewertbare Gesteinskörnungen (i.d.R. mitteldeutsche Kiese) eingesetzt werden, als Referenzmaterialien für einen Teil der Prüfungen zusätzlich als alkaliempfindlich bekannte Gesteinskörnungen (u. a. Opalsandstein und Flint, gebrochene Grauwacke). Die Performance-Prüfungen sollen an in der Praxis üblichen Betonzusammensetzungen erfolgen (Rezepturen aus Bauvorhaben der WSV). Alle Ausgangsstoffe (Zement, Zusatzstoffe, Gesteinskörnungen) werden durch Stoffprüfungen charakterisiert. Für die Zuordnung der Gesteinsarten sowie deren alkaliempfindliche Bestandteile soll vor Beginn der Untersuchungen eine petrografische Bewertung der Gesteinskörnungen erfolgen.

### 3 Ergebnisse

Im Berichtsjahr 2013 wurden die Performance-Prüfungen an Betonen beendet und an den Probekörpern lichtmikroskopische Untersuchungen durchgeführt. Die folgenden Betone mit Zusammensetzungen aus aktuellen Bauvorhaben der WSV wurden untersucht:

Beton	Zement		Wasser		Luft	Gesteinskörnungen				
	Bez.	z	w	w/z	LP	Bez.	0/2	2/8	8/16	16/32
	-	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	-	%	-	Kg/m <sup>3</sup>			
1	Z1	360	163	0,45	1,5	GK1	724	390	743	-
2	Z2	350	161	0,46	5,5	GK2	694	199	438	473
3	Z3	430	172	0,40	1,5	GK3	666	426	674	-
4	Z4	335	160	0,48	5,5	GK4	629	359	359	449

Tabelle 1: Betonzusammensetzungen für Performance-Prüfungen (b)

Mit diesen Betonen wurden die Performance-Prüfungen für je 2 Varianten ((a) ohne und (b) mit Salzbelastung) durchgeführt. Jeder Lagerungszyklus umfasste neben einer Trocken- und Feucht-Warm-Lagerung auch mehrere Frost-Tau-Wechsel.

Wie im Bericht 2012 gezeigt, ist es mit der Variante (b) gegenüber bislang zur Verfügung stehenden Verfahren möglich, die Beständigkeit des Betons auch bei Alkalizufuhr zu prüfen. Bei zwei Betonen (mit den Gesteinskörnungen GK2 und GK4) führte eine Alkalizufuhr (NaCl-Lösung) eindeutig zu erhöhten Dehnungen infolge schädigender Treiberscheinungen. Bei Beton 2 wurde dies bereits nach 12 Lagerungszyklen nachgewiesen. Bei Beton 4 verlief der Dehnungsanstieg etwas langsamer, nach 13 Zyklen wurde der Grenzwert jedoch ebenfalls überschritten (siehe Bild 1).

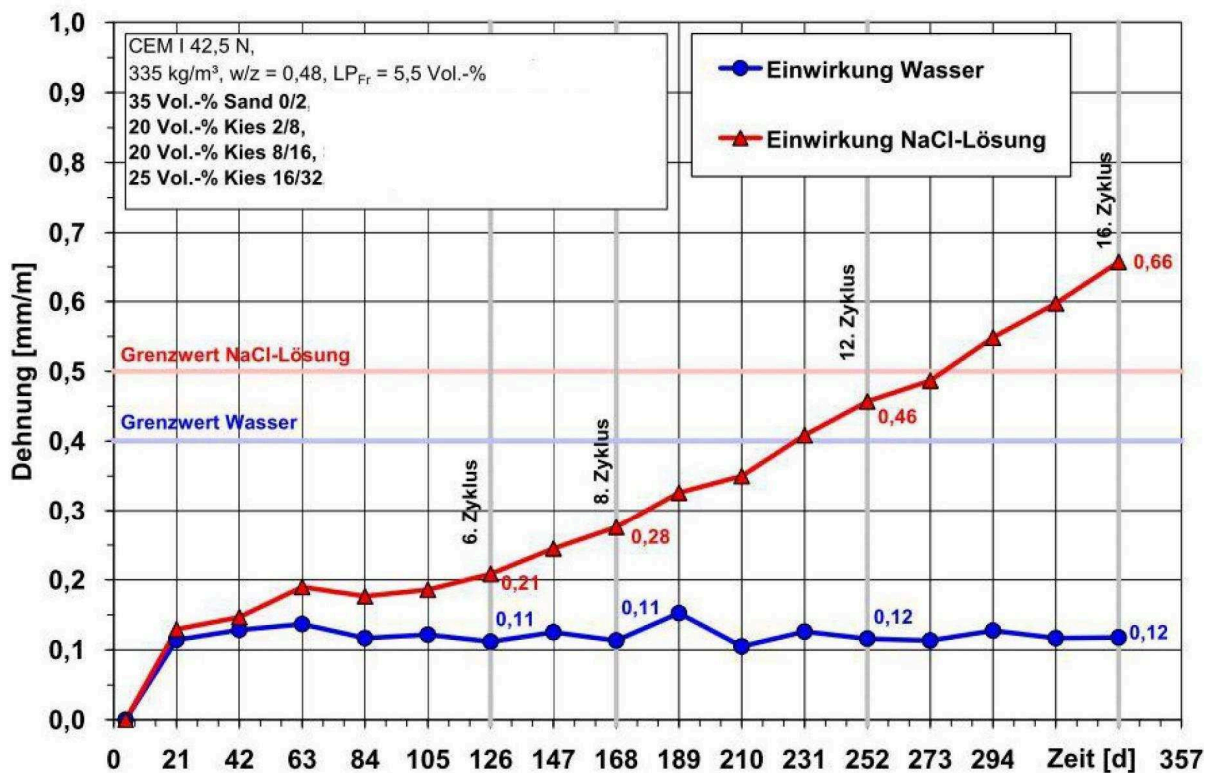
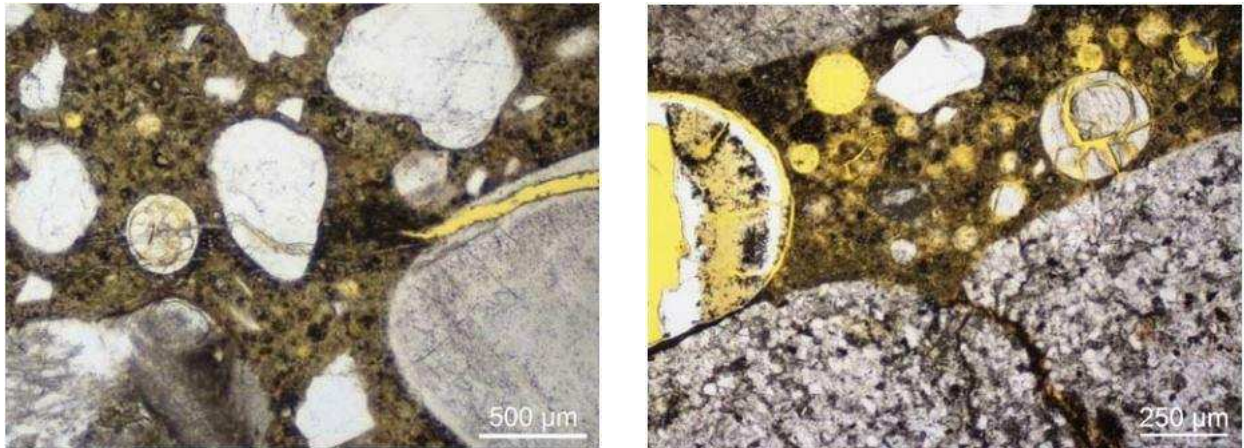


Bild 1: Ergebnis AKR-Performance-Prüfung für die Gesteinskörnung GK4

Nach Abschluss der Performance-Prüfungen wurden an den Probekörpern lichtmikroskopische Untersuchungen an Dünnschliffen durchgeführt, um eine AKR als Schadensursache nachzuweisen. Bei den Betonen 2 und 4 wurden (im Vergleich zur Prüfung ohne Salzbelastung) nach Einwirkung von NaCl-Lösung deutliche AKR-Merkmale in Form von Anlöseerscheinungen (Reaktionssaum), AKR-Gel in Porenräumen und gerissenen Gesteinskörnern gefunden.



*Bild 2: Dünnschliffaufnahmen Betone mit GK2 (links, Kieselschiefer) und GK4 (rechts, Grauwacke) mit Rissbildungen und Gelansammlungen in den Poren*

Mit Hilfe der Performance-Prüfung konnte somit bei 2 der 4 untersuchten Betone eine Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen nachgewiesen werden, welche bei einer Alkalizufuhr während der bei Verkehrswasserbauwerken üblichen sehr langen Nutzungsdauer mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Schäden am Beton führen würde.

Die Ergebnisse aller Untersuchungen werden in einem Abschlussbericht zusammengefasst. Basierend auf diesen Erkenntnissen sowie unter Berücksichtigung der Entwicklung weiterer Performance-Prüfverfahren (Borchers, Müller, 2014) werden im Zusammenhang mit der Einführung der neuen Alkali-Richtlinie ergänzende Maßnahmen und Vorgehensweisen zur Schadensvermeidung an Verkehrswasserbauwerken erarbeitet.

**4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2015: Fertigstellung des Abschlussberichts.

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2015.

**5 Literatur**

Borchers, I; Müller, Ch.(2014): Praxisgerechte Prüfung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen für die Feuchtigkeitsklassen WF und WA in AKR-Performance-Prüfungen. Beton 64 (2014) 10, S. 403-409.

**6 Veröffentlichungen**

-/-

## **Textilbewehrte Mörtel für die Instandsetzung von Wasserbauwerken**

**Netzplan-Nr.:** A39510370010

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. A. Westendarp, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** andreas.westendarp@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Das bereits im Rahmen des FuE-Vorhabens A39510310238 nachgewiesene Vermögen von Textilbewehrung, Bewegungen von Einzelrissen im Altbeton auf mehrere Risse im Instandsetzungsmörtel zu überführen, ist nur ein Baustein im Hinblick auf die Eignung textilbewehrter Spritzmörtel/Spritzbetone für die Instandsetzung massiger, geringfester und gerissener Bauteile von Verkehrswasserbauwerken. In der Praxis werden sich die im Rahmen des vorangegangenen FuE-Vorhabens zunächst vereinfachend angenommenen Randbedingungen (vollflächig ausreichender Adhäsionsverbund, kein Durchtritt von Wasser durch das Bauteil hindurch an die Rückseite der Instandsetzungsflächen, keine Ausbildung von Spaltwasserdruck) keineswegs immer einstellen. In einem nächsten Schritt sind deshalb geeignete Verankerungssysteme für textilbewehrte Spritzmörtelschichten zu konzipieren. Für das Gesamtsystem sind geeignete Bemessungsansätze zu erstellen, die es dem sachkundigen Planer derartiger Instandsetzungsmaßnahmen ermöglichen, Textilbewehrung und Verankerung in Abhängigkeit bestimmter Bauwerksgegebenheiten (u. a. Größenordnung eines etwaigen Spaltwasserdrucks) zu konzipieren. Zu prüfen ist weiterhin, inwieweit neben Spritzmörtel/Spritzbetonen auch in Schalung eingebrachte Mörtel oder Betone in Verbindung mit Textilbewehrung Anwendung finden können.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Mit dem Ersatz korrosionskritischer Bewehrung aus Stahl durch Textilbewehrung könnte der WSV ein Verfahren zur Verfügung gestellt werden, mit dessen Hilfe sich Instandsetzungen insbesondere an älteren massiven Wasserbauwerken wie beispielsweise Wehrpfeilern zielsicherer und kostengünstiger als bislang realisieren ließen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel ist es, das Instandsetzungssystem „Textilbewehrte Mörtel und Betone“ dahingehend weiter zu entwickeln, dass der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung geeignete, ausschreibungsreife Lösungen für bestimmte Randbedingungen (freibewittert/Wasserwechselbereich; mit/ohne Spaltwasserdruckansatz etc.) zur Verfügung gestellt werden können. Als potentielles Anwendungsgebiet für derartige Instandsetzungslösungen sind hierbei insbesondere die alten Wehranlagen an Main, Neckar, Weser etc. in den Fokus zu nehmen.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Das Forschungsvorhaben soll in drei Teile gegliedert werden:

**Teil 1:** Begutachtung der am Wehr Horkheim im Rahmen des FuE-Vorhabens A39510310238 angelegten Probeflächen inkl. Auswertung der begleitenden Bauwerksmessungen; Untersuchungsbericht

**Teil 2:** Fachliche Begleitung des DFG-Transferprojektes T09 „Schutzschichten aus textilbewehrtem Spritzmörtel zur Instandsetzung von Wasserbauwerken“ der RWTH Aachen

*Anmerkung: Im DFG-Transferprojekt T09 werden wesentliche noch offene Fragen zu textilbewehrten Spritzmörteln behandelt, eigene Aufwendungen seitens der BAW sind hier, von der fachlichen Begleitung und Steuerung abgesehen, nicht erforderlich.*

**Teil 3:** Bearbeitung in Teil 2 offengebliebener grundsätzlicher Fragestellungen. Fachliche Begleitung der Instandsetzung von Wehrpfeilern des Neckarwehrs Horkheim mittels textilbewehrtem Mörtel/Beton im Rahmen der Grundinstandsetzung

### 3 Ergebnisse

#### Zu Teil 1:

In 2013/2014 wurden die im Rahmen des FuE-Vorhabens A39510310238 an Wehrpfeilern der Wehranlage Horkheim erstellten Probeflächen (Spritzmörtel mit unterschiedlicher Textilbewehrung) durch die RWTH Aachen begutachtet, der Untersuchungsbericht liegt vor. Die Untersuchungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- An keiner der Probeflächen konnte mittels der durchgeführten Untersuchungen ein Versagen der SPCC-Schichten festgestellt werden.
- Die maximal im Zeitraum 9/2010 bis 6/2013 gemessenen Rissbreitenänderungen lagen bei etwa 0,28 mm.
- Alle im Rahmen der Untersuchungen detektierten Rissbreiten in den textilbewehrten SPCC-Schichten sind kleiner als 0,1 mm.
- Bei den textilbewehrten Probeflächen kann ein direktes „Durchschlagen“ der im Untergrund vorhandenen Risse, anders als bei der unbewehrten Probefläche, zielsicher vermieden werden.
- Die Messungen mittels Dehnungsmessstreifen zeigen, dass die textilbewehrte Schicht im enthafteten Bereich neben den Rissen bei Rissöffnung wie geplant Zugspannungen aufnimmt.
- Im Rahmen der Haftzugprüfungen wurde ein Mittelwert von 1,6 N/mm<sup>2</sup> bestimmt. Einzelwerte lagen unterhalb 1,0 N/mm<sup>2</sup>. Durch die textile Bewehrung wurde die Haftzugfestigkeit gegenüber einer unbewehrten SPCC-Schicht teilweise reduziert.

#### Zu Teil 2:

Im Rahmen einer Arbeitsgruppe aus RWTH Aachen, Fa. w+s und BAW wurden Lastansätze für die Beanspruchung des Verbundes zwischen Altbeton und textilbewehrter Mörtelschicht definiert, welche als Grundlage für die Entwicklung von Ankersystemen dienen.

Das DFG-Transferprojektes T09 wurde planmäßig zum 31.12.2014 beendet, der Abschlussbericht wird bis zum 31.03.2015 unter Federführung des ibac fertiggestellt. Offene Fragen u. a. zu den Verankerungselementen, zum Verhalten bei rückseitigem Wasserdruck und zur Dauerhaftigkeit können im Rahmen des Transferprojektes nicht abschließend beantwortet werden.

#### Zu Teil 3:

Seitens der BAW ist zu prüfen, welche ergänzenden Untersuchungen noch erforderlich sind, um ein vergabereifes Konzept für die Instandsetzung der Betonoberflächen am Wehr Horkheim zu erstellen. Diese Untersuchungen sollen durch die BAW beauftragt und von den Partnern aus dem Transferprojekt möglichst in 2015 durchgeführt und abgeschlossen werden.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015: Erstellung des Abschlussberichts zu Transferprojekt aus Teil 2 durch RWTH Aachen/ibac bis 31.03.2015. Festlegung, Beauftragung und Durchführung ergänzender Untersuchungen im Hinblick auf die Instandsetzung am Wehr Horkheim.

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2015.

### 5 Literatur

-/-

### 6 Veröffentlichungen

Morales Cruz, C.; Raupach, M.; Westendarp, A.; Bruder, S. (2014): Untersuchungen an einer vier Jahre alten Schutzschicht aus textilbewehrtem Spritzbeton am Wehr Horkheim. Beton 10/2014, S. 390-395, Verlag Bau+Technik.

## **Energetische Optimierung der WSV-Gebäude**

**Netzplan-Nr.:** A39510470001

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. D. Erndwein, Abteilung Bautechnik, Referat Konstruktive Gestaltung (B4)

**E-Mail:** daniel.erndwein@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Gebäude sind im Mittel zu 40 % am Energieverbrauch und an der CO<sub>2</sub>-Belastung beteiligt, weshalb hier das größte Einsparpotential gesehen wird. Der Energieverbrauch der WSV-Gebäude wird bisher noch unzureichend erfasst. Eine zentrale Erfassung der Energieverbrauchsdaten in einem Energiemanagement-System hätte zum Vorteil, dass man über Kennwertbildung (Benchmarking) ineffiziente Gebäude identifizieren könnte. Im nächsten Schritt kann man dann gezielt Maßnahmen einleiten, um die Situation in diesen Gebäuden zu verbessern.

Der Aufbau eines kontinuierlichen Energiemanagement eröffnet auch die Möglichkeit Fehler in der Anlagentechnik oder im Betrieb von Gebäuden aufzudecken. Solche Aufzeichnungen ermöglichen den täglichen Betrieb effizienter zu gestalten, ohne dass man große bauliche Veränderungen am Gebäude vornimmt. Die steigenden Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) und die Vorbildfunktion der Bundesbauten führen dazu, dass die Energiekonzepte immer ganzheitlicher und komplexer werden müssen, so dass hier eine langfristige Planung der Einzelmaßnahmen eine immer größer werdende Bedeutung zukommt. In diesem Energiemanagement-System sollen die Energieverbrauchsdaten für Wärme, Strom, und evtl. Wasser, erfasst und bilanziert werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Ein Energiemanagement-System bietet jederzeit einen Überblick über den Energieverbrauch der einzelnen Gebäude der WSV. Die Daten aus der Datenbank bilden die Grundlage für weitere Änderungen bzw. Sanierungen an den Gebäuden der WSV.

Die Bundesregierung hat sich verpflichtet bis zum Jahr 2020 20 % Energie einzusparen und 20 % der Energieversorgung durch regenerative Energiequellen zu decken. Mit dem Aufbau eines Energiemanagement-System kann die WSV ihren Teil dazu beitragen, damit dieses Ziel erreicht wird.

Größere Energieeffizienz und damit Einsparung von Energie führt auch zu einer Einsparung der laufenden Betriebskosten.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Ziel ist eine Energieverbrauchserfassung aller WSV-Gebäude zu erreichen und die Daten in einer Datenbank aufzubereiten, um ineffiziente Gebäude über Kennzahlen (Benchmarking) identifizieren und gezielt Sanierungsmaßnahmen durchführen zu können.

Es wird ein kleiner Maßnahmenkatalog für die energetische Sanierung von Gebäuden erstellt werden, der bei den einzelnen Sanierungen als Leitfaden verwendet werden kann.

### **2 Untersuchungsmethoden**

In einem ersten Schritt erfolgt eine Analyse des Gebäudebestandes (Energieverbrauchs- und erste gebäudespezifische Daten). Dann werden exemplarisch Gebäude ausgewählt, die mit Energiebedarfsberechnungen genauer analysiert werden. Für diese Gebäude werden Sanierungsvarianten erarbeitet und rechnerisch überprüft, um den Prozess einer Gebäudeoptimierung beispielhaft darzustellen. In einem weiteren Schritt wird ein Gebäudemonitoring installiert, um eine effiziente Betriebsweise der Gebäude auf Dauer sicherzustellen und WSV-weit die Überblicks-Funktion herzustellen.



### 3 Ergebnisse

Zur Analyse des Gebäudebestandes wurde in 2012 ein Energieverbrauchs-Erfassungsbogen entwickelt. Mit Hilfe dieses Bogens wurde eine WSV-weite Abfrage von Gebäude- und Energieverbrauchsdaten durchgeführt. Die Rücklaufquote lag erfreulich hoch bei ca. 90 %. Jedoch wurden lediglich 40 % der Erfassungsbögen vollständig ausgefüllt, so dass nur von diesen ein gesicherter Energieverbrauchskennwert ermittelt werden konnte, der den Anforderungen der EnEV gerecht wird.

Es sind aktuell 349 Gebäude von 150 Außenbezirken/Bauhöfen aus 35 Ämtern erfasst und teilweise analysiert.

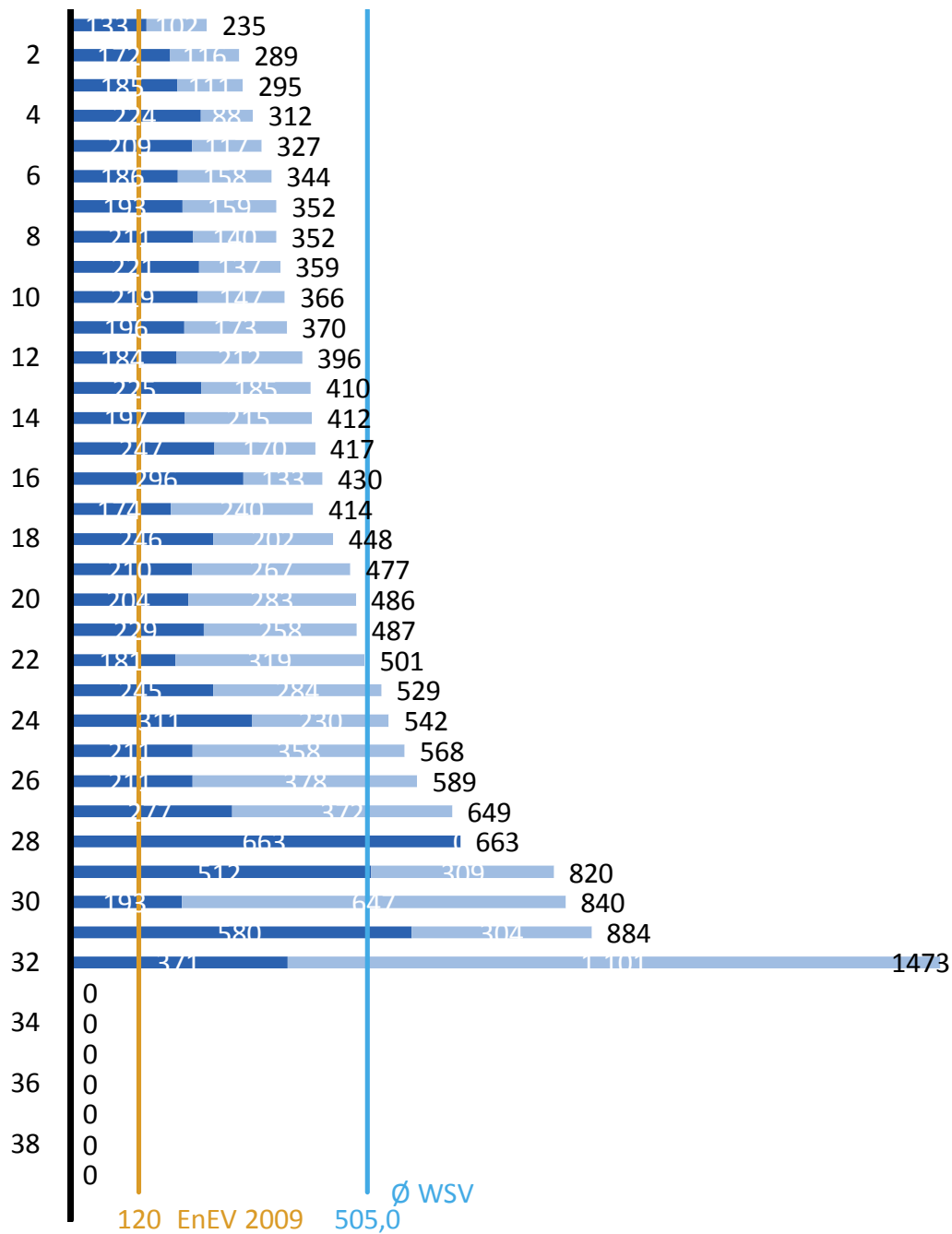


Bild 1: Primärenergieverbrauchskennwerte für Wärme (dunkel) und Strom (hell) der Wasser- und Schifffahrtsämter in kWh/m²a

Bei einem Großteil der erfassten Gebäude ist es oftmals unklar, was von den Zählern genau erfasst wird, weil keine genaue Dokumentation des Bestandes vorhanden ist. Generell lässt sich feststellen, dass die Datengrundlage zu den einzelnen Gebäuden sehr inhomogen ist.

Die erfassten Daten wurden grafisch aufbereitet und als Rückmeldung für die einzelnen Ämter in Kurzberichten zusammengefasst.

Es wurde deutlich, dass es an vielen Stellen an Zählern fehlt, die eine gebäudescharfe Beurteilung der Verbräuche teilweise nicht zulässt. In einigen Energieverbräuchen, vor allem beim Strom, sind Verbraucher (Hafenbeleuchtung, Ladestationen für Schiffe, etc.) enthalten, die nichts mit dem Gebäude zu tun haben.

Ein durchschnittliches Gebäude eines Außenbezirk/Bauhof wurde im Jahr 1968 gebaut und hat eine Fläche von 517 m<sup>2</sup>. Es wird mit einer Gasheizung beheizt, die ca. 15 Jahre alt ist und gleichzeitig für die Warmwasserbereitstellung zuständig ist.

Auf der Grundlage von Plänen wurde mit ersten Energiebedarfsberechnungen begonnen, um die Energieverbräuche besser einordnen zu können. Die Ausschreibung für weitere Energiebedarfsberechnungen im Bereich der GDWS West wird aktuell fertiggestellt.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

- 2015:
- Bedarfsberechnungen von auffälligen Gebäuden
  - Entwicklung von beispielhaften Sanierungskonzepten
  - Analyse und Bewertung der Sanierungskonzepte
  - Zusammenstellung der Ergebnisse

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2015.

#### **5 Literatur**

-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

-/-

**Parameter für Stoffgesetze bei FE-Berechnungen****Netzplan-Nr.:** A39520205613**Projektleiter:** Dr.-Ing. M. Herten, Abteilung Geotechnik, Referat Grundbau (G2)**E-Mail:** markus.herten@baw.de**1 Problemstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

In letzter Zeit wurden viele neue Stoffgesetze, manche auch unter Mitwirkung der BAW, entwickelt und in kommerziellen Finite-Elemente-Programmen implementiert. Jedoch stellt sich die Frage, unter welcher Voraussetzung (Gegebenheiten) es notwendig ist, solche Modelle einzusetzen und welche Parameter für die Verwendung dieser Modelle wichtig sind. Weiterhin sollen die Stoffgesetze durch den Vergleich von Prognosen, die durch FE-Berechnungen unter Verwendung dieser Modelle ermittelt wurden, anhand der Messergebnisse an Bauwerken kalibriert werden.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Bedeutung für die WSV besteht darin, dass möglichst zutreffende Verformungsprognosen aufgestellt werden können. Dadurch wird sowohl eine größere Wirtschaftlichkeit erzielt, als auch mehr Sicherheit erreicht. Eine Simulation des Verhaltens von Bauwerken kann dadurch, insbesondere bei schwierigen Baugrundverhältnissen, weit besser als bisher möglich erfolgen.

**1.3 Untersuchungsziel**

Die Ziele der Untersuchung sind, die Parameter bereits vorhandener Stoffgesetze, aus Labor- und Feldversuchen zu ermitteln bzw. abzuleiten, Stoffgesetze an wasserbautypische Bedingungen anzupassen und in FE-Programmen zu implementieren.

**2 Untersuchungsmethoden**

Ursprünglich war der Fokus auf Laborversuche gelegt. Es hat sich jedoch im Laufe der Bearbeitung gezeigt, dass Felduntersuchungen und Nachrechnungen (B-Prediction) besser geeignet sind, die Prognosen zu optimieren. Auf dieser Grundlage sollen Mängel von existierenden, in FE-Software implementierten Stoffgesetzen durch Weiterentwicklungen bzw. neue Implementierungen gemindert werden.

**3 Ergebnisse**

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhaben sind in einer Vielzahl von Veröffentlichungen (s. Abschnitt 6) dokumentiert. In der aktuellen Entwicklung der FEM zeigt sich, dass diese immer öfter nicht nur zur Prognose von Verformungen, d. h. für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit (SLS), sondern auch für die Bemessung (ULS) Verwendung findet. Dadurch gewinnt die Wahl der „richtigen“ Parameter für die Stoffmodelle zusätzlich sicherheitsrelevante Bedeutung (Herten M., 2013). Bei komplexeren Stoffmodellen, die nicht mit Scherwinkel, Scherfestigkeit, Kohäsion und Druckfestigkeit beschrieben werden, wird eine gesonderte Vorgehensweise benötigt, um das normativ vorgegebene Sicherheitsniveau einzuhalten. Für das Hoek-Brown-Stoffmodell wird ein solches Vorgehen von Benz et. al. (2008) und für beliebige Stoffmodelle von Potts (2012) beschrieben.

**4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

In 2015 sollen die in vielen Veröffentlichungen dargestellten Ergebnisse in einem Abschlussbericht zusammengetragen und Handlungsanweisungen für zukünftige Projekte entwickelt werden. Danach soll das Forschungsprojekt beendet werden.

Laufzeit des Vorhabens: 1997 bis 2015.

## 5 Literatur

- Benz, T., Kauther, R., Schwab, R. (2006): "Simulation of a large excavation using a Hoek-Brown model, 6th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Graz, Österreich, 6. - 8. September 2006
- Potts, D. M., Zdravkovic, L. (2012): Accounting for partial material factors in numerical analysis, Géotechnique, Volume 62, Issue 12, September, pages 1053 –1065
- Herten, M. (2013): "EC 7 - Welches Nachweisverfahren ist das Richtige?" Workshop, 24.-25.09.2013, Institut für Geotechnik und Baubetrieb TU Hamburg-Harburg, Bd. 27

## 6 Veröffentlichungen

- Saathoff, J., Schwab, R. (2004): "Anwendung der Finite-Element-Methode (FEM) beim Entwurf der neuen Schleuse Sülfeld Süd", Baugrundtagung, Leipzig, 22. bis 25. September 2004, Glückauf, Essen, S. 89-96
- Schwab, R., Benz, T.(2006): "Baubegleitende Simulation der Interaktion zwischen benachbarten Bauwerken", 18. Deutschsprachige Abaqus-Benutzerkonferenz, Erfurt, 18. - 19. Sept. 2006
- Benz, T., Schwab, R., Vermeer, P. A.: "Zur Berücksichtigung des Bereichs kleiner Dehnungen in geotechnischen Berechnungen", Bautechnik, Jg. 84, H. 11, S. 749-761, 2007
- Schwab R., Benz T., Vermeer P. (2007): "An accompanying small-strain model for a large excavation", Proc. XIV European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid
- Benz, T.; Schwab, R.: "A quantitative comparison of four rock failure criteria" (2008), International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Jg. 45, H. 7, S. 1176-1186
- Benz, T.; Schwab, R., Kauther, R. A., Vermeer, P. A. (2008): A Hoek-Brown criterion with intrinsic material strength factorization. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 45, pp. 210-222.
- Benz T.; Vermeer P. A., Schwab R. (2009): A small-strain overlay model. - In: International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Band 33 pp. 25-44, John Wiley & Sons, London
- Stelzer, O.; Schwab, R.; Neumann, S. (2010): Neubau der Südschleuse Sülfeld – Schlussfolgerungen aus den geotechnischen Messungen und den baubegleitenden FE Berechnungen, Messen in der Geotechnik, Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technische Universität Braunschweig
- Stelzer, O., Kauther, R. (2011): Relevance of small-strain stiffness in the deformation analysis of navigable locks, International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, September 1-3, Seoul, Korea

## **Bruch- und Verformungsverhalten von rutschgefährdeten Böschungen unter Berücksichtigung des Dreiphasensystems**

**Netzplan-Nr.:** A39520210001

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. R. Schulze, Abteilung Geotechnik, Referat Grundbau (G2)

**E-Mail:** roland.schulze@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Zur Beurteilung von rutschgefährdeten Böschungen ist die Kenntnis der effektiven Spannungen im Bereich der Scherzone von großer Bedeutung. Hierzu ist eine zutreffende Einschätzung des herrschenden Porenwasserdruckes erforderlich. Die Porenwasserdruckverhältnisse können zeitlich und räumlich stark veränderlich sein. Dies gilt insbesondere in bindigen Böden, die hydraulisch nur gering durchlässig sind.

Als Auslöser von Böschungsrutschungen gilt (auch in bindigen Böden) häufig ein Anstieg der Sickerlinie. In der bisherigen Praxis wurden Messungen fast ausschließlich in offenen Grundwasserbeobachtungsrohren durchgeführt. Da infolge der geringen Durchlässigkeit des Bodens eine hinreichende Wasserspiegeländerung im Messrohr, wenn überhaupt, nur zeitlich extrem verzögert erfolgen kann, ist dieses Verfahren zur Ermittlung der Wasserdruckverhältnisse in gering durchlässigen Böden ungeeignet. Die Verwendung von Porenwasserdrucksensoren, die in geeigneter Weise im Boden eingebaut werden, ist deshalb zur Erfassung der maßgebenden hydraulischen Verhältnisse im bindigen Boden unbedingt erforderlich.

Als theoretischer Unterbau wird das Dreiphasenmodell (bestehend aus Feststoff, Wasser und Gas) angewendet.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Bedeutung dieser Untersuchungen für die WSV besteht darin, dass zahlreiche Problemböschungen an Binnenschifffahrtskanälen mit der o. g. Charakteristik (bindige Böden, unterhalb der Sickerlinie, besondere Beanspruchung durch Absenk) existieren. Die vorgesehenen Untersuchungen schaffen Voraussetzungen für ein verbessertes grundlegendes Verständnis der maßgebenden mechanischen Modellvorstellung. Auf dieser Grundlage werden wirksame Sanierungskonzepte entwickelt, die eine sinnvolle und wirtschaftliche Sanierung der gefährdeten Böschungen ermöglichen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

- Abschätzung des Einflusses der Kompressibilität des Porenwassers auf das Bruch- und Verformungsverhalten von Böschungen
- Sammlung von praktischer Erfahrung mit Porenwasserdrücken in bindigen Böden (Einschätzung der Druckentlastungsgeschwindigkeit, Optimierung der Bemessung der vorgeschlagenen Druckentlastung, Abschätzung saisonaler Einflüsse auf die Porenwasserdruckverteilung usw.)
- Entwicklung geeigneter Laborversuche zur Identifizierung und Ermittlung maßgebender Parameter
- Entwicklung von praxistauglichen und wirtschaftlichen Sanierungsverfahren für rutschungsgefährdeten Böschungen

### **2 Untersuchungsmethoden**

Um die Eigenschaften von gering durchlässigen Böden hinreichend zu erfassen, sind geotechnische Feldmessungen (Porenwasserdruck, Verformungen usw.) u. a. an rutschgefährdeten Böschungen erforderlich. Damit soll untersucht werden, welchen Einfluss die Kompressibilität des Porenwassers auf das Bruch- und Verformungsverhalten dieser Böschungen besitzt.

### 3 Ergebnisse

Auf Vorschlag der BAW wurde in zwei Messprofilen bei SKH-km 2,95 bzw. 3,55 die Standsicherheit der Einschnittsböschungen erhöht, indem durch gezielte Druckentlastung durch 2001/2002 hergestellte Bohrungen die Möglichkeit zum Porenwasserdruckabbau geschaffen wurde. Die zeitliche Veränderung der Porenwasserdruckverteilung sowie die Verschiebungen der Böschungen werden seither im Rahmen einer Eignungsprüfung gemessen. Die Bohrungen entlasten im Endzustand mindestens entsprechend einem Potenzial, das durch die geodätische Ansatzhöhe der Bohrungen maßgebend beeinflusst wird. Grundlegende Voraussagen zur Porenwasserdruckentwicklung, die auf der Anwendung des Dreiphasenmodells basieren, konnten somit messtechnisch verifiziert werden.

Die Standsicherheit der Böschung wurde wesentlich verbessert und die Rutschungsgeschwindigkeit um rund 85 % vermindert. Durch den Einbau von Druckentlastungsbohrungen konnte bereichsweise eine aufwändige Abflachung der Böschung vermieden werden.

Um den Einfluss witterungsbedingter Randbedingungen zu minimieren, wurden ergänzend im Tonbergwerk Klingenberg/Main in einem Probestollen Porenwasserdruckmessungen durchgeführt. Mit diesen Messungen, die dort seit 2005 durchgeführt wurden, soll die Ausbreitung von Porenwasserdruckänderungen in einem relativ homogenen und sehr gering durchlässigen Bodenmaterial messtechnisch erfasst werden. Im Laufe der Jahre zeigte sich, dass Auswirkungen im Zusammenhang mit der Herstellung des Probestollens die Porenwasserdruckentwicklung maßgebend beeinflussen. Einzelheiten sind in Schulze (2011) beschrieben. Darin werden u. a. Schlussfolgerungen gezogen, die neue Perspektiven zum Bruch- und Verformungsverhalten von Tonböschungen eröffnen, wobei Anwendungsgrenzen der in Abschnitt 1.1 genannten Kontinuumsmodelle überschritten werden. Die im o. g. Aufsatz beschriebenen Beobachtungen zu plötzlichen Veränderungen der Materialeigenschaften des Tongebirges können konzeptionell auch zur Abschätzung der zeitabhängigen Standsicherheit von Einschnittsböschungen in überkonsolidiertem Ton verwendet werden.

In Klingenberg wurden die letzten Messungen planmäßig Ende 2011 durchgeführt, bevor im Zusammenhang mit der Betriebsschließung des Tonbergwerks der Probestollen endgültig versiegelt wurde.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Grundlegende Ergebnisse dieses Forschungsprojektes sind in den Beitrag von Schulze & Stelzer (2015) zur zweiten Deutschen Bodenmechanik Tagung eingeflossen, dessen Tagungsband 2015 erscheint. Auf Grund der Erstellung dieses umfangreichen Beitrags wurde die Beendigung des FuE-Vorhabens auf 2015 verschoben.

Laufzeit des Vorhabens: 1999 bis 2015.

### 5 Literatur

-/-

### 6 Veröffentlichungen

- Köhler H.-J., Schulze R. (2009): Stabilisierung von Einschnittsböschungen mittels Wasserdruckentlastung im stationären und instationären Strömungszustand. 24. Christian Veder Kolloquium, Technische Universität Graz, Heft 35, p. 295-312, ISBN 978-3-900484-52-1
- Schulze R. (2010): Beitrag zum BAW-Kolloquium FuE im Binnenverkehrswasserbau am 03. März 2010 in Karlsruhe
- Schulze R. (2011): Pore water pressure effects in clay due to unloading – long-term measurements, change of soil fabric and application. Proc. 8<sup>th</sup> International Symposium on Field Measurements in GeoMechanics (FMGM), 2011, Berlin
- Schulze R., Stelzer O. (2015): Soil modelling considering the influence of gas inclusions in pore water below the piezometric line – a short introduction. In: Schanz/Hettler (Hrsg.): Aktuelle Forschung in der Bodenmechanik 2015, Tagungsband „2. Deutsche Bodenmechanik Tagung“ am 19. Mai 2015 an der Ruhr-Universität Bochum, S. 81-100, Springer Verlag

## **Böden unter Stoßbelastung**

**Netzplan-Nr.** A39520210014

**Projektleiterin:** Dipl.-Ing. R. Kauther, Abteilung Geotechnik, Referat Grundbau (G2)

**E-Mail:** regina.kauther@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Im laufenden Betrieb der Bundeswasserstraßen kommt es immer wieder zu Anfahrungen von Schiffen auf die Ufer der Wasserstraßen. Die bisher verfügbaren Berechnungsverfahren basieren auf der Annahme eines starren Ufers (z. B. aus Beton). Unter der Voraussetzung eines starren Ufers werden die größt-möglichen Kontaktkräfte zwischen Schiff und Böschung sowie der größtmögliche vertikale Weg (Anhebung) des Schiffes aus dem Wasser berechnet. Die im Bereich der WSV dokumentierten Schadensfälle zeigen jedoch, dass die Schiffe in das Ufer eindringen, so dass die Annahme der starren Böschung nicht als realitätsnah gelten kann. Aufgrund der im Vergleich zur starren Böschung geringeren Kontaktkräfte wird in der Tendenz bei der Anfahrung an eine verformbare Böschung ein längerer horizontaler Bremsweg erwartet, so dass die vorhandenen Berechnungsverfahren für die Randbedingungen der verformbare Böschung erweitert werden müssen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Obwohl die Schäden am Schiff und an den Ufern meist ohne längere Unterbrechungen des Betriebs behoben werden können, ist es für die Einschätzung von Gefahrensituationen einerseits und die Dimensionierung von Schutzbauwerken andererseits von zentralem Interesse, die Bremswege und Kontaktkräfte zwischen Schiff und Ufer wirklichkeitsnah prognostizieren zu können. Solche geböschten Schutzbauwerke aus Bodenmaterial haben bisher insbesondere bei temporären Baugruben in Kanälen und Flüssen ihre Anwendung gefunden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

In Rahmen des Forschungsvorhabens wird das Eindringverhalten von typischen Binnenschiffen in Böschungskörper aus nicht kohäsivem Bodenmaterial untersucht. Das Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung von Prognoseverfahren für den Bremsweg und die Kontaktkräfte zwischen Schiff und Boden. Als Eingangsgrößen für die Prognoseverfahren sollen die bekannten Schiffsparameter Anfahrtgeschwindigkeit und Tiefgang des Schiffes sowie die Böschungsgeometrie (Neigung und Höhe der Böschung) verwendet werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Als Untersuchungsmethodik wurde die bodenmechanische Modellversuchstechnik angewandt. Die Versuche wurden in den Modellmaßstäben 1:75, 1:23 und 1:17,8 ausgeführt. Zur Erfassung der Einflüsse aus den hydromechanischen und -dynamischen Randbedingungen auf den Stoßvorgang und zur Messung der Porenwasserdrücke im Boden während des Stoßvorganges wurden zusätzlich drei Naturversuche durchgeführt.

### **3 Ergebnisse**

Zur Berechnung des Bremswegs wurden von Kauther und Schuppener (2008) in Abhängigkeit des Schiffbugtyps bodenmechanische Berechnungsmodelle entwickelt, mit denen die Eindringung der Schiffe in die Uferböschung und die dabei auftretenden Kontaktkräfte ermittelt werden können. Da die Auswertung der Modell- und der Naturversuche gezeigt hat, dass Trägheitskräfte nur zu Beginn des Schiffsstoßes eine relevante Größe besitzen und auf die Länge des Bremswegs deshalb nur einen untergeordneten Einfluss haben, genügen zunächst Modelle, bei denen der Schiffsstoß als quasistatischer Vorgang abgebildet wird. Die Bremswegberechnung beruht auf dem Energieerhaltungssatz der Mechanik und bilanziert die kinetische Energie des Schiffes zu Beginn des Bremsvorgangs mit der Deformationsarbeit längs des Bremswegs und der Potentiellen Energie durch die Anhebung des

Schiffes. Die Auswertung der Modellversuche zeigt, dass während des Bremsvorgangs von einer Mobilisierung des Grenzzustandes des passiven Erddrucks im Boden vor der Bugwand ausgegangen werden kann. Die Größe des passiven Erddrucks ist von der Größe und der Neigung der Wandfläche, die mit dem Boden in Kontakt ist sowie von der Lage der Kontaktfläche in der Böschung (Neigung der Böschung oberhalb der Kontaktfläche und Abstand der Kontaktfläche zur Geländeoberkante) beeinflusst. Da sich das Schiff weiterbewegt bis die kinetische Anfangsenergie transformiert ist, wird davon ausgegangen, dass im Boden fortlaufend neue Bruchkörper entstehen. Dies konnte sowohl anhand von Messungen als auch von Videoaufnahmen eines unter statischen Bedingungen ausgeführten Versuches mit dem Spitzbugschiff Gerda verifiziert werden. Die flächenhaft und in unbekannter Verteilung zwischen Bug und Boden wirkenden Kontaktspannungen werden für die Berechnung der Energiebilanz zu einer resultierenden Kraft zusammengefasst. Der Angriffspunkt der Kraft ändert sich ebenfalls mit der Veränderung der Lage und der Größe der Kontaktfläche. Außer den Kräften aus dem Erdwiderstand wird die Änderung der Auftriebskraft bei der Anhebung des Schiffes berücksichtigt.

Das Berechnungsverfahren wurde zunächst für das Pontonbugschiff aufgestellt und anhand der Versuchsergebnisse validiert.

Für die Berechnung der Länge des Bremswegs und der Kontaktkräfte müssen die Bodenparameter Wichte, Reibungswinkel und Wandreibungswinkel zwischen Bug und Böschung bekannt sein. Weitere Eingabeparameter sind die Anfahrgeschwindigkeit des Schiffes, die Masse und der Tiefgang sowie die Geometrie des Buges und der Böschung (Böschungshöhe und Neigung).

Da der Verlauf des Bremswegs nicht von vorneherein bekannt ist, wird das Berechnungsverfahren inkrementell formuliert. Die wichtigsten Schritte des Berechnungsverfahrens sind:

- Berechnung der Größe und Lage der Kontaktfläche in Abhängigkeit einer vorgegebenen inkrementellen Drehung  $\Delta\psi$  des Schiffes innerhalb jeden Weginkrementes  $\Delta x$
- Berechnung der vertikalen Differenzkraft aus Schiffsgewicht und Auftrieb in Abhängigkeit der Schiffposition (Anhebung des Schiffes aus dem Wasser)
- Berechnung des passiven Erddrucks auf die ermittelte Kontaktfläche
- Ermittlung der im Weginkrement maximal möglichen Anhebung des Schwerpunkts  $\Delta z_s$  mit Hilfe der Bedingung, dass die vertikale Auflagerkraft nicht größer als die vertikale Komponente des Erdwiderstands sein kann
- Berechnung der Deformationsarbeit im Boden, der Potentiellen Energie und der verbleibenden kinetischen Energie. Das Schiff kommt zum Stillstand, wenn die kinetische Energie vollständig transformiert ist

Anhand der Validierung des Berechnungsverfahrens konnte gezeigt werden, dass sowohl der Verlauf des Bremswegs als auch die Länge und die Größe der Kontaktkräfte für das Pontonbugschiff in sehr guter Übereinstimmung mit den Messwerten ermittelt werden können. Für eine Anwendung des Berechnungsverfahrens auf den Bremsvorgang des Spitzbugschiffs musste das Verfahren in folgenden Punkten erweitert werden:

- Berücksichtigung der Breitenentwicklung des Buges:  
Da beim Spitzbugschiff im Gegensatz zum Pontonbugschiff keine konstante Breite des Buges angenommen werden kann, muss bei der Berechnung des passiven Erddrucks die Breitenentwicklung des Buges in Abhängigkeit der Eindringung des Schiffes in die Böschung und der Lage der Kontaktfläche auf dem Bug bestimmt werden. Dazu werden die entsprechenden Spantenpläne der Spitzbugschiffe verwendet.
- Berücksichtigung einer Sohlreibung als zusätzliche bremsende Kraft:  
Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass das Spitzbugschiff im Vergleich zum Pontonbugschiff bei gleicher Geschwindigkeit einen längeren Bremsweg besitzt, womit es auch tiefer in die Böschung eindringt. Deshalb kann zusätzlich zum frontal auf das Schiff wirkenden passiven Erddruck eine Reibungskraft zwischen Schiffssohle und Boden berücksichtigt werden. Für die Erweiterung des Rechenmodells um diesen Einfluss, ist neben dem Coulomb'schen Reibungsbeiwert Schiffsstahl/Boden auch die Kenntnis der Größe der auf die Schiffssohle wirkenden Kontaktnormalkraft erforderlich. Diese wiederum bestimmt sich aus



der Reaktion und der Größe des beteiligten Bodenbereiches unter dem Schiff. Aus den durchgeführten Experimenten war bekannt, dass unterhalb der Schiffssohle kein klassischer Grundbruch („general shear failure“) stattgefunden hat, sondern vielmehr der Boden unter der Auflast des Schiffes überwiegend zusammengedrückt wird. Eine solche Reaktion kann durch das Versagensmodell des „local shear failure“ (Terzaghi, 1943) erfasst werden. Der mobilisierbare Bodenwiderstand ist bei diesem Versagensmodell kleiner im Vergleich zum „general shear“-Versagen

Mit dem für das Spitzbugschiff erweiterten Berechnungsverfahren wurden auch die drei Naturversuche nachgerechnet. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messungen. Einflüsse, die beim Modellversuch ausgeschlossen waren, wie z. B. das mit dem Schiff mitbewegte Wasserwellensystem und die Elastizität des Schiffes, haben sich auch beim Naturversuch als nicht relevant herausgestellt. Untersuchungen von Kramer (2008) zum Einfluss des Porenwassers in der Böschung ergaben, dass der in den Naturversuchen gemessene Porenwasserüberdruck bei der Bremswegberechnung vernachlässigt werden kann. Für die Berechnung des Erdwiderstandes genügt ein Ansatz der Auftriebswichte für den wassergesättigten Bodenbereich. Diese Erkenntnis konnte auch mit dem von der BAW aufgestellten Berechnungsverfahren (Kauther, 2007) bestätigt werden. Das Ergebnis erstaunt insofern, als dass in experimentellen Untersuchungen von Ottensen Hansen et al. (1995) große Unterschiede für den Bodenwiderstand auf das Schiff für trockenen im Vergleich zu wassergesättigtem Sand festgestellt wurden. Dabei wurden für den wassergesättigten Sand 10- bis 20-fach größere Reaktionskräfte gemessen. Auf der Suche nach einer Erklärung führten Ottensen Hansen und Gislason (2007) Kegelfallversuche in trockene und wassergesättigte Sande aus. Eine Erklärung für die hier bis zu 70-fach größeren Reaktionskräfte wurde im Auftreten von Porenwasserunterdrücken (Saugspannungen) bis hin zur Kavitationsgrenze gefunden. Eine kritische Analyse der Versuche ergab, dass dieser Effekt jedoch nur bei sehr dichten Sanden in Kombination mit hohen Eindringgeschwindigkeiten auftritt. Bei den unter Zwangsführung durchgeführten Schiffsstoßversuchen (Ottensen Hansen et al., 1995) kommen vermutlich auch noch Einflüsse aus dem Versuchsaufbau hinzu. Bei den von der BAW durchgeführten Naturversuchen wurde die Böschung aus Kiessand greiferweise unter Wasser hergestellt. Hierbei kann höchstens von einer mitteldichten Lagerung ausgegangen werden, wahrscheinlich lag aber sogar nur eine lockere Lagerung vor. In der Folge traten bei den Naturversuchen keine Porenwasserunterdrücke sondern Porenwasserüberdrücke auf, die jedoch den Verlauf und die Länge des Bremsweges nicht relevant beeinflussten. Für die Dimensionierung von Schutzböschungen in der verkehrswasserbaulichen Praxis bedeutet dies, dass auf den Ansatz eines erhöhten Bodenwiderstandes verzichtet werden soll, wenn nicht eindeutige Hinweise dafür vorliegen, dass sich Saugspannungen während des Bremsvorgangs im Untergrund entwickeln können.

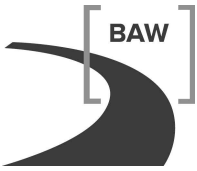
#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Abschließend wird im Jahr 2015 der Bremsweg in der dynamischen Phase untersucht. Die Beendigung des Forschungsvorhabens mit der Erstellung des Abschlussberichts ist in 2016 vorgesehen.

Laufzeit des Vorhabens: 1997 bis 2016

#### 5 Literatur

- Kramer, H. (2008): Schiffsstoß auf Uferböschungen, Naturversuche mit Gerda, Bremswegberechnung, Ingenieurbüro Kramer&Albrecht, Hamburg, Dezember 2008
- Ottensen Hansen, N.-E., Simonsen, B.C., Sterndorff, M.J. (1995): Soil Mechanics of Ship Beaching in Kim, H. (HG.): Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering, Seoul, South Korea
- Ottensen Hansen, N.-E., Gislason, K. (2007): Soil Reactions in Saturated Sand Caused by Impulsive Loads, Journal of Waterway, Ports, Coastal and Ocean Engineering, Volume 133, January/February 2007, S. 39-49
- Terzaghi, K. (1943): Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, Inc. New York



## 6 Veröffentlichungen

Kauther R., Schuppener, B. (2007): Physical Modelling of Ship Collisions with Embankments of Waterways, 4<sup>th</sup> International Conference on Collision and Grounding of Ships, ICCGS 2007, Hamburg, Germany

Kauther, R., Schuppener, B. (2008): Ship collision with waterway embankments - a proposal for the calculation of the stopping distance and the contact forces, 11<sup>th</sup> Baltic Sea Geotechnical Conference, September 2008, Danzig, Poland

**Modellierung der Verformung nichtbindiger Böden unter zyklischer Belastungseinwirkung von Schleusenbauwerken**

Netzplan-Nr.: A39520210045

Projektleiterin: Dipl.-Ing. K. Bergholz, Abteilung Geotechnik, Referat Grundbau (G2)

E-Mail: katharina.bergholz@baw.de

**1 Problemstellung und Ziel**

**1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Nichtbindige Böden zeigen infolge zyklischer Belastung eine bedeutende Akkumulation plastischer Verformungen. Dies kann sowohl in Laborexperimenten als auch bei Setzungsmessungen wechselbeanspruchter Bauwerke beobachtet werden. Insbesondere bei Schleusen, die in der Regel eine sehr hohe Lastamplitude aufweisen, können beachtliche Langzeitsetzungen verzeichnet werden (Bild 1). Sind diese Langzeitsetzungen nicht schon in der Planungsphase hinreichend genau bekannt, können sie zu erheblichen Bauwerksschäden führen.

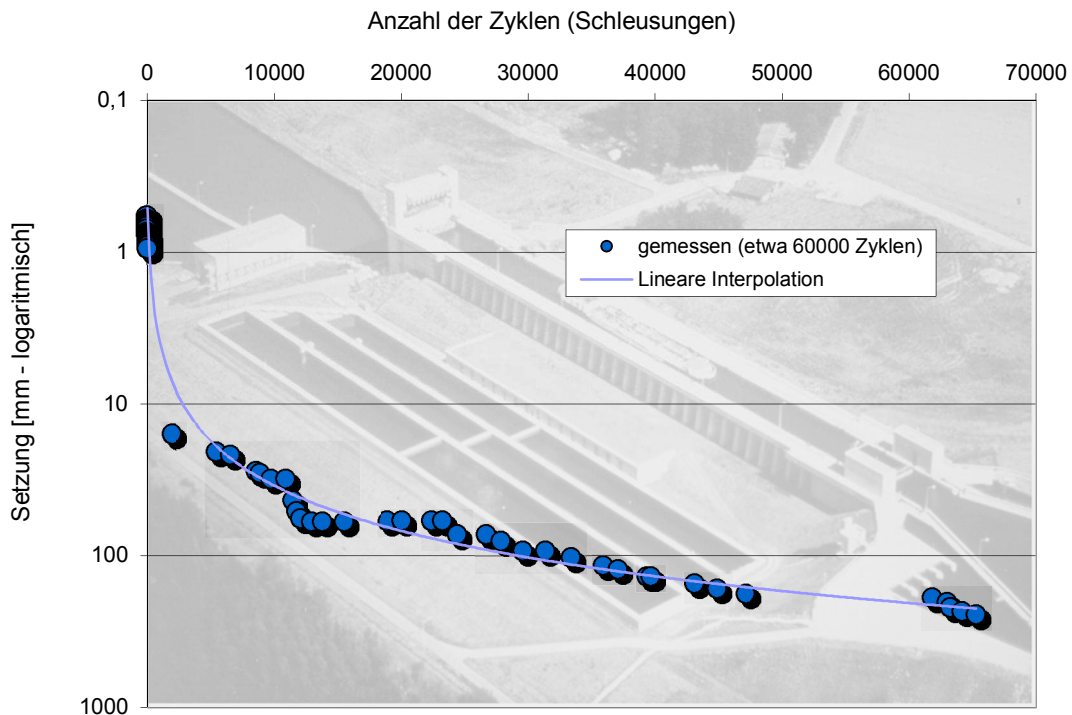


Bild 1: Setzungen der Schleuse Uelzen I als Funktion der Lastzyklen (= Schleusungen)

Mit den derzeit verfügbaren elasto-plastischen sowie den inkrementell formulierten Stoffgesetzen (z. B. Hypoplastizität) können Langzeitsetzungen mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) nur unzulänglich abgebildet werden. Zudem erfordert eine hohe Anzahl von Lastzyklen bei diesen Modellen eine sehr hohe Rechenleistung, da jeder Lastzyklus einzeln berechnet werden muss. Pseudoviskose Stoffgesetze, bei denen die Lastzyklen als Zeit (Pseudozeit) ausgedrückt werden, verursachen hingegen einen relativ geringen Rechenaufwand. Diese Stoffgesetze sind jedoch empirisch und daher schwer zu bewerten.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Sowohl zur Vermeidung von Bauwerksschäden als auch für die wirtschaftliche Bemessung einzelner Bauteile ist eine gute Abschätzung der zu erwartenden Langzeitsetzungen unbedingt erforderlich; so ist z. B. die Wahl der einzubauenden Fugenbänder direkt von der Bauwerkssetzung abhängig.

### 1.3 Untersuchungsziel

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Stoffgesetzes, das es erlaubt, Langzeitsetzungen von Schleusenbauwerken hinreichend genau zu berechnen. In einem Finite-Elemente-Programm (ABAQUS/PLAXIS) implementiert, soll das Rechenmodell in der Lage sein, viele tausend Lastzyklen bei akzeptablem Rechenaufwand abzubilden. Abschließende Empfehlungen für die Praxis sollen basierend auf den Untersuchungsergebnissen erarbeitet werden.

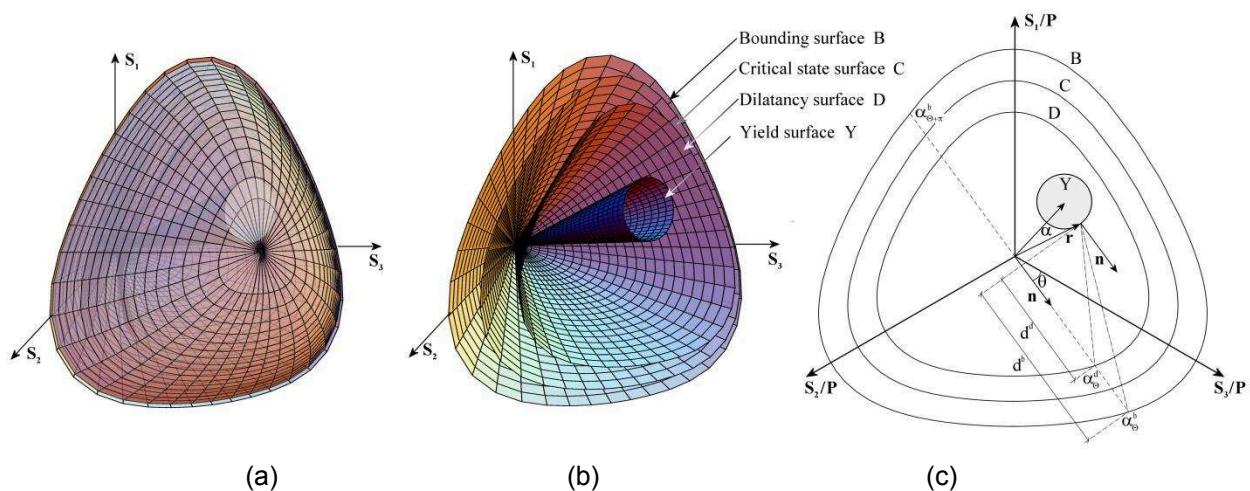
### 2 Untersuchungsmethoden

Numerische Modellrechnungen, Laborversuche, Vergleich mit Langzeitmessungen.

### 3 Ergebnisse

Das aus der Forschungsarbeit von 2002 bis 2004 resultierende elasto-plastische Stoffgesetz aus der Klasse der Bounding-Surface-Modelle (Forschungsbericht 2004) wurde in den Jahren 2005 und 2006 den Bedürfnissen praktischer Anwendungen weiter angenähert. Ein Algorithmus zur Bestimmung der im Modell intern verwendeten Parameter wurde erarbeitet und erprobt. Dieser Algorithmus konvertiert allgemein verwendete bodenmechanische Kenngrößen in die internen Parameter des Rechenmodells. Da keine analytischen Beziehungen zwischen diesen bestehen, werden die internen Modellparameter iterativ bestimmt. Die Anzahl dieser iterativ zu bestimmenden internen Modellparameter des Ausgangsmodells wurde zunächst zu Gunsten der Robustheit des Konvertierungsalgorithmus verringert. Ein modifiziertes Modell *ohne* isotrope Verfestigung der Fließfläche wurde implementiert. Ohne isotrope Verfestigung wurde es nun auch möglich, den Bereich kleiner Dehnungen über die Steifigkeit innerhalb des elastischen Bereiches direkt zu definieren, was eine weitere Modellvereinfachung darstellt.

Die Struktur des vereinfachten Modells besteht weiterhin aus den in Bild 2 dargestellten Komponenten. Die Kappe des Modells wurde identisch zur Kappe des Hardening-Soil-Modells gewählt. Zusätzlich enthält das Modell eine isotrope Erinnerungsfläche für die maximal aufgebrachte deviatorische Dehnung (in Bild 2 nicht dargestellt). Das vereinfachte Modell wurde für triaxiale Bedingungen getestet. Konvergenzprobleme wurden bei sehr kleinen mittleren Spannungen erkannt.



**Bild 2:** Das verwendete Bounding-Surface-Modell im Hauptspannungsraum dargestellt:  
 (a) Kappe – nur der hervorgehobene Bereich der Kappe ist aktiv;  
 (b) Grenzflächen des Modells; (c) Projektionsregeln.

Im Jahr 2013 wurde die Bearbeitung des Forschungsprojektes mit neuen Personalressourcen wieder aufgenommen. Nach einer Einarbeitungsphase stand die Verbesserung des Konvertierungsalgorithmus zur Ermittlung der internen Modellparameter im Mittelpunkt der Entwicklungsarbeit, die auch 2014 weitergeführt wurde. Die Anzahl der iterativ zu bestimmenden Parameter wurde erhöht und mit Hilfe

eines neuen Optimierungsalgorithmus die Zuverlässigkeit und numerische Stabilität der Routine deutlich verbessert.

Die Dilatanzformulierung des ursprünglichen Materialmodells wurde als eine wichtige Ursache für die zu beobachtende Überschätzung des initialen kontraktanten Verhaltens identifiziert und daher deren Modifizierung in den Fokus gerückt. Die Eignung verschiedener alternativer Modellierungsansätze, insbesondere aus der Literatur, wird aktuell untersucht.

In diesem Zuge zeigte sich außerdem, dass das Zusammenwirken von Kappe und konusförmiger Fließfläche („Konus“, „Yield surface“ in Bild 2(b)) einer belastungsrichtungsabhängigen Steuerung bedarf, um sowohl triaxiale als auch oedometrische bzw. isotrope Spannungspfade mit dem gleichen Parametersatz abbilden zu können. Neben dem bestehenden Zwei-Fließflächen-Modell (Kappe und Konus) wurde in diesem Zusammenhang auch ein mathematisch geschlossener Ansatz für eine zusammenhängende Fließfläche implementiert und getestet.

Zusammenfassung der im Projekt bislang erzielten Ergebnisse:

- Numerische Umsetzung eines Bounding-Surface-Modells; erste erfolgreiche Nachrechnung von Laborversuchen, erste Nachrechnung des Setzungsverlaufs der Schleuse Uelzen
- Implementierung eines Algorithmus zum Überspringen von Zyklen
- Entwicklung eines neuen Modellierungsansatzes für den Bereich kleiner Dehnungen
- (HS-Small Modell – im FE Programmsystem PLAXIS verfügbar)

Diese Ergebnisse wurden von Vermeer et al. (2006), Benz (2007) und Benz et al. (2007, 2009) in internationalen und nationalen Fachzeitschriften veröffentlicht.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Aufgrund des großen Bedarfs für ein Stoffgesetz, welches das zyklische Bodenverhalten zutreffend simulieren kann, ist geplant, das Forschungsvorhaben bis 2016 zum Abschluss zu bringen. Die jüngere Entwicklungsarbeit hat gezeigt, dass es noch wichtiger Modifikationen bedarf, um mit Hilfe des vorliegenden Bounding-Surface-Modells bestimmte Eigenschaften des Bodens realitätsnah abzubilden. Diese werden nicht nur als Voraussetzung für die erfolgreiche Simulation zyklischen Tragverhaltens angesehen, sondern ermöglichen auch die Modellierung anderer baupraktisch relevanter Belastungssituationen. Vor der Implementierung eines speziellen Mechanismus zur Erfassung sich akkumulierender Dehnungen ist daher vorgesehen, Modellkomponenten wie die Formulierung der Dilatanz zu optimieren, Materialeigenschaften wie Anisotropie und Nicht-Koaxialität zu integrieren sowie die bestehenden Konvergenzprobleme des numerischen Modells zu beheben. Im Anschluss soll das implementierte Stoffgesetz anhand von vorhandenen Laborversuchsdaten und In-situ-Langzeitmessungen validiert werden, um es so für baupraktische Anwendungen bereitstellen zu können.

Laufzeit des Vorhabens: 2002 bis 2016

#### **5 Literatur**

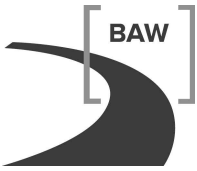
-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

Vermeer, P. A., Schwab, R., Benz, T. (2006): Two Elastoplastic Models for Small and Large Strains and Their Use in Engineering Practice. In: Wu, W., Yu, H. S. (Ed.): Modern Trends in Geomechanics. Springer Berlin, New York, pp. 175-190.

Benz, T. (2007): Small-Strain Stiffness and its Numerical Consequences. Dissertation. Mitteilung 55 des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart.

Benz, T., Schwab, R., Vermeer, P. A. (2007): Zur Berücksichtigung nichtlinearer Bodensteifigkeit im Bereich kleiner Dehnungen in geotechnischen Berechnungen. Bautechnik, Band 84, Heft 11, S. 749-761.



Benz, T., Vermeer, P. A., Schwab, R. (2009): A small-strain overlay model. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Volume 33, Issue 1, pp. 25-44.

Benz, T., Schwab, R., Vermeer, P. A. (2009): Small-strain stiffness in geotechnical analyses. Bau-technik, Volume 86, Issue Supplement 1, pp. 16-27.

## **Modellierung des Tragverhaltens von Verpressankern in Sand**

**Netzplan-Nr.:** A39520270003

**Projektleiterin:** Dipl.-Ing. X. Domes (Stodieck), Abteilung Geotechnik, Referat Grundbau (G2)

**E-Mail:** xenia.domes@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Verpressanker weisen ein äußerst komplexes Tragverhalten auf, welches von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird. Da die Vorgänge des Lastabtrags in den Boden und die Einflüsse verschiedener Herstellungsparameter auf den Herauszieh Widerstand wenig bekannt ist, basiert die Bemessung von Verpressankern bisher auf empirischen Werten. Falls für die Vorbemessung nicht genügend Erfahrungswerte für die örtlichen Baugrundverhältnisse zur Verfügung stehen, müssen gegebenenfalls im Vorfeld Probeanker für vorgezogene Eignungsprüfungen hergestellt werden. Um die in der Ausführungsstatik geforderte Tragfähigkeit nachzuweisen, ist in der Regel für jede Baumaßnahme eine Eignungsprüfung an drei Anker und nach der Herstellung an jedem Anker ein Belastungstest (Abnahmeprüfung) vorgeschrieben. Die Feststellung des tatsächlichen Herauszieh Widerstandes erfordert jedoch eine Belastung bis zum Versagen des Ankers.

Für die realistische Simulation des Tragverhaltens von Verpressankern ist die Berücksichtigung der einzelnen Mechanismen des Tragverhaltens (Verbund zwischen Zement und Boden, Verspannung im Baugrund durch Dilatanz, Lastumlagerung am Verpresskörper etc.) notwendig. Diese sind bisher jedoch noch nicht ausreichend untersucht. Unter anderem ist nicht vollständig geklärt, inwiefern die Ankerherstellung und insbesondere der Verpressvorgang den Spannungszustand und die Bodeneigenschaften des anstehenden Bodens verändert und welchen Einfluss die Höhe des Verpressdrucks auf den Herauszieh Widerstand hat. Da die mechanischen Eigenschaften und der Spannungszustand des anstehenden Bodens jedoch entscheidend für die realistische Simulation des Tragverhaltens von Verpressankern sind, ist eine zuverlässige numerische Berechnung des Herauszieh Widerstands bisher nicht möglich.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

In der WSV wird jährlich eine Vielzahl von Verpressankern hergestellt. Die Tragfähigkeit dieser Anker ist neben den Baugrundeigenschaften und dem Ankertyp trotz normativer Regelungen maßgeblich von der Herstellung beeinflusst, d. h. verschiedenen Firmen bzw. auch Kolonnen einer Firma erreichen unterschiedliche Herauszieh Widerstände. Gelingt es, maßgebliche Herstellungsparameter zu identifizieren, können diese entsprechend gefordert und überwacht werden. Des Weiteren ermöglicht ein besseres Verständnis des Tragverhaltens von Verpressankern gegebenenfalls die numerische Prognose des Herauszieh Widerstands und eine Validierung der zurzeit üblichen empirischen Abschätzung.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel ist die Entwicklung eines numerischen Modells, welches das Tragverhalten von Verpressankern unter bestimmten Randbedingungen abbildet. Als Grundlage für die numerische Simulation sollen die Mechanismen der Lastabtragung sowie die Herstellungseinflüsse zur Optimierung der Ankertechnik ermittelt werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Im Rahmen der Herstellung von Probeankern finden an verschiedenen Standorten Druckmessungen im Bohrloch während und nach dem Verpressvorgang statt. Verpressanker werden mit Drucksensoren bestückt, um die Verteilung des Verpressdrucks über die Verpresskörperlänge zu untersuchen. Sondierungen mit einem Flat-Dilatometer sollen Aufschluss über den Einfluss der Ankerherstellung auf den Spannungszustand im angrenzenden Boden geben.

Ergänzend zu den Feldversuchen wird anhand von Laborversuchen das Filtrationsverhalten von Zementsuspension in Sand sowie die mechanischen Eigenschaften des noch nicht ausgehärteten Verpressgutes untersucht.

Auf der Grundlage der durchgeführten Feld- und Laborversuche findet anschließend die Entwicklung ein numerisches Modells statt, welches den Einfluss des Herstellungsprozesses und verschiedene Mechanismen des Tragverhaltens von Verpressankern berücksichtigt. Anschließend ist eine Validierung des numerischen Modells durch Nachrechnen instrumentierter Ausziehversuche vorgesehen.

### 3 Ergebnisse

Als Grundlage für die Entwicklung eines numerischen Modells fanden Untersuchungen der Einflüsse der Ankerherstellung in nichtbindigen Böden statt.

Bereits im Vorfeld der Projektlaufzeit wurden Messungen des Verpressdrucks im Bohrloch durchgeführt. Diese zeigten, dass eine Filtration der Zementsuspension bei der Herstellung von Verpressankern in Sand stattfindet. Während des Verpressvorgangs wurde im Bohrloch ein Übergang von hydrostatischer zu anisotroper Spannungsverteilung beobachtet, was sich durch Entwicklung einer Schubsteifigkeit des Materials durch Ausfiltern erklären lässt.

Zusätzliche Erddruckmessungen mit einem Flat-Dilatometer vor und nach Ankerherstellung zeigten qualitativ eine Erhöhung der Radialspannungen in dem an die Verpressstrecke angrenzenden Boden. Messungen auf unterschiedlichen Baustellen mit ähnlichen Baugrundverhältnissen haben gezeigt, dass die Art der Ankerherstellung große Auswirkungen auf die Spannungsentwicklung und die Filtrationszeit der Zementsuspension hat.

Ergänzende Laborversuche mit variierenden Wassergehalten und Verpressdrücken gaben Aufschluss über das Filtrationsverhalten von Zementsuspension sowie die mechanischen Eigenschaften des Filterkuchens. Die Versuche zeigten, dass die Filterkuchendicke mit der Quadratwurzel der Versuchszeit zunahm. Die festgestellte Filtrationsrate der Zementsuspension war abhängig vom Wassergehalt der Suspension und vom Verpressdruck. Je höher der Druck und je geringer der Wassergehalt, desto schneller bildete sich ein Filterkuchen aus.

Im Anschluss an die Filtrationsversuche wurde das noch nicht abgebundene Filterkuchenmaterial untersucht. Der Wassergehalt des Filterkuchens lag für Verpressdrücke  $\geq 500$  kPa im Mittel bei 0,29, während er für geringe Verpressdrücke 0,32 betrug. Die Wasserdurchlässigkeit des Filterkuchens lag zwischen  $k = 3 \times 10^{-8}$  und  $2 \times 10^{-7}$  m/s. Einaxiale-Durckversuche ergaben eine Druckfestigkeit von über 200 kPa.

In Triaxialversuchen wurde ein Reibungswinkel von ca.  $38^\circ$  und eine Kohäsion von 30 kPa ermittelt. Ödometerversuche zeigten eine spannungsabhängige Steifigkeit des Materials, die sich näherungsweise mit

$$E_{\text{Oed}} = 4.4 \dots 5.9 * \left( \frac{\sigma_{v'}}{100} \right)^{0.75}$$

beschreiben lässt. Durch den Verpressvorgang wurde dem Filterkuchenmaterial eine Vorbelastung eingeprägt, welche sich in den Ödometerversuchen durch eine anfänglich höhere Steifigkeit bei Vertikalspannungen unterhalb des jeweils angewandten Verpressdruckes auszeichnete.

Zur Berechnung des Filtrationsvorganges von Zementsuspension wurden zwei verschiedene Ansätze gegenübergestellt: Die Zwei-Phasen-Filtrationstheorie (McKinley und Bolton, 1999) und die Terzaghi-Konsolidierung (Lee et al., 2012; Picandet et al., 2011). Diese Ansätze stellen eine obere und untere Grenze des tatsächlichen Filtrationsverhaltens dar. Das Zwei-Phasen-Filtrationsmodell ist ein analytischer Ansatz, basierend auf der Ausfilterung von Feststoffteilchen aus einer Flüssigkeit.



#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

In der aktuellen Projektphase wird der Abschlussbericht verfasst.

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2015.

#### 5 Literatur

Lee, S.-W.; Kim, T.-S.; Sim, B.-K.; Kim J.-S., Lee, I.-M. (2012): "Effect of pressurized grouting on pullout resistance and group efficiency of compression ground anchor". *Canadian Geotechnical Journal*. 49 (8): 939-953.

McKinley, J. D., Bolton, M. D. (1999): "A geotechnical description of fresh cement grout - filtration and consolidation behaviour". *MAGAZINE OF CONCRETE RESEARCH*. 51 (5): 295-308.

Picandet, V.; Rangeard, D.; Perrot, A., Lecompte, T. (2011): "Permeability measurement of fresh cement paste". *Cement and Concrete Research*. <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00716295>.

#### 6 Veröffentlichungen

Stodieck, X.; Benz, T. (2013): Cement grout filtration in non-cohesive soils. In: "Installation effects in geotechnical engineering : proceedings of the International Conference on Installation Effects in Geotechnical Engineering, Rotterdam, the Netherlands, 24-27 March 2013", Hicks, Michael A. [Hrsg.], CRC Press/Balkema..

Stodieck, X.; Benz, T. (2014): Zementfiltration bei der Herstellung von Verpressankern in nichtbindigen Böden. Tagungsband des Johann-Ohde-Kolloquiums der TU Dresden und der Bundesanstalt für Wasserbau, Dresden, 26. März 2014.

## **Hydraulischer Grundbruch unter unterströmten Bauwerken mit luftseitigen Auflastfilter**

**Netzplan-Nr.:** A39520370001

**Projektleiterin:** Dipl.-Ing. Ch. Laursen, Abteilung Geotechnik, Referat Grundwasser (G3)

**E-Mail:** charlotte.laursen@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Auf Grundlage numerischer Grundwasserströmungsberechnungen durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass für Baugruben mit unterströmten, relativ gering in den Untergrund einbindenden Wänden und baugrubenseitigem Auflastfilter der Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch gemäß den deutschen, aktuellen geotechnischen Regelwerken keine auf der sicheren Seite liegenden Ergebnisse liefert. Dies ist begründet durch die in diesem Fall signifikanten, vertikalen Strömungsanteile unterhalb des Wandfußes, die in üblichen Berechnungsansätzen nicht berücksichtigt werden. Zur sicheren Dimensionierung des Auflastfilters wurde von der BAW ein auf numerischen Strömungsberechnungen basierendes Verfahren vorgestellt, durch das auch die vertikalen Strömungskräfte unterhalb des Wandfußes sowie zusätzlich Sicherheiten nach DIN 1054 berücksichtigt werden (Odenwald, Herten, 2008).

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Bei Baumaßnahmen an Schifffahrtskanälen werden in zunehmendem Maß tiefe Baugruben unmittelbar neben in Betrieb befindlichen Kanalstrecken erstellt, um den Schifffahrtsbetrieb auch während der Baumaßnahme aufrecht zu erhalten. Um die aus dem Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch resultierende, erforderliche Einbindetiefe der Baugrubenumschließungswände in den Baugrund zu reduzieren, erfolgt die Sicherung gegen hydraulischen Grundbruch oft durch einen Auflastfilter auf der Baugrubensohle. Die Entwicklung eines auf der sicheren Seite liegenden Berechnungsansatzes ist für die WSV von grundlegender Bedeutung für die sichere und wirtschaftliche Durchführung von Baumaßnahmen an Bundeswasserstraßen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Untersuchung des Versagensmechanismus des hydraulischen Grundbruchs bei luftseitig aufgebrachtem Auflastfilter. Auf Grundlage der im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Untersuchungen, die sich aus numerischen Berechnungen und Modelluntersuchungen zusammensetzen, soll der von der BAW entwickelte, vereinfachte Berechnungsansatz (Odenwald, Herten, 2008) validiert und ggf. weiterentwickelt werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Der Fokus liegt auf der Durchführung von Versuchen zur Visualisierung des Bruchvorganges. Zur visuellen Auswertung der Versuche wird die Particle Image Velocimetry (PIV) Method eingesetzt. Ergänzend werden numerischen Berechnungen mittels Diskrete-Elemente-Methode (Particle Flow Code) durchgeführt um die Ergebnisse der Modellversuche nachzumodellieren.

### **3 Ergebnisse**

Im Auftrag der BAW wurden von der Universität der Bundeswehr München (Prof. Boley) ein Versuchstand zur Visualisierung des Versagens durch hydraulischen Grundbruch bei Unterströmung einer Spundwand erstellt und insgesamt 22 Versuche mit einer umfangreichen messtechnischen Begleitung durchgeführt. Im Rahmen dieser Versuche wurden die Einbindetiefe der Spundwand und die Einbaustärke des Filters variiert. Die Versuche zeigten, dass der zeitliche Ablauf des Versagensprozesses bei den Versuchen mit geringer Filterdicke und denen mit größerer Filterdicke grundsätzlich verschieden ist und belegen somit, dass die Dicke des Filters einen bedeutenden Einfluss auf den Versagensprozess hat. Bei den Versuchen mit geringer Filterschichtdicke zeigten sich deutliche Hebungen in dem der Spundwand vorgelagerten Bereich bereits einige Potenzialstufen bevor der eigentliche Bruch

eintrat. Bei den Versuchen, die mit großen Filterdicken durchgeführt wurden, trat der Bruch ein bis drei Minuten nach Beobachtung der ersten Hebungen auf. Beispielhaft sind in Bild 1 die absoluten Bewegungen im Bereich des Spundwandfußes für verschiedene Potentialstufen dargestellt, die mit Hilfe der Particle Image Velocimetry (PIV) Method ausgewertet wurden.

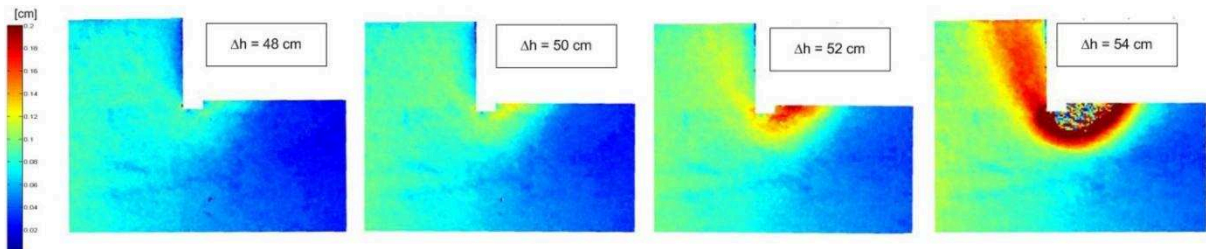


Bild 1: Absolute Bewegungen im Bereich des Spundwandfußes für verschiedene Potentialstufen

Um eine direkte Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsansatz nach Odenwald und Herten (2008) zu schaffen, wurde der Berechnungsansatz an die Randbedingungen des Modellversuches angepasst. Bild 2 zeigt die im Versuch und anhand des Berechnungsansatzes ermittelten maximalen (kritischen) Potentialdifferenzen  $\Delta h_{krit}$  in Abhängigkeit der Einbindetiefe der Spundwand. Die Werte zeigen eine relativ gute qualitative Übereinstimmung. Quantitativ ist jedoch eine deutliche, mit zunehmender Dicke des Auflastfilters wachsende Abweichung zu erkennen.

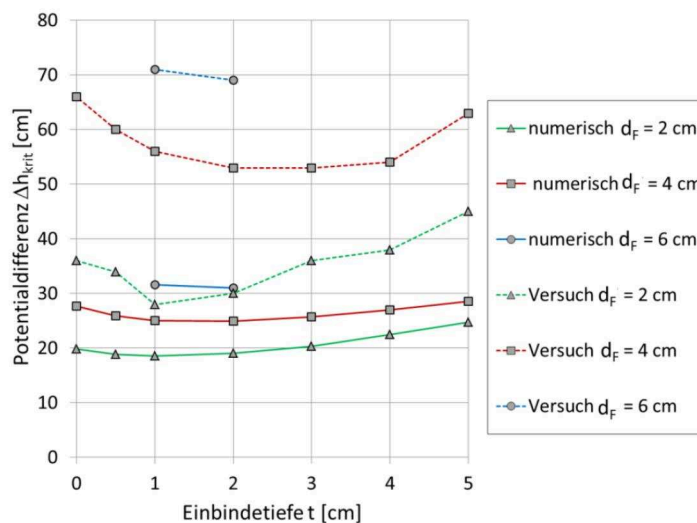


Bild 2: Vergleich Versuchsserie - Berechnungsansatz nach Odenwald und Herten (2008)

Zur Modifizierung des Berechnungsansatzes nach Odenwald und Herten (2008) wurden folgende Varianten betrachtet:

- Variante 1: Ersatzkörpergeometrie entsprechend der mittels PIV Methode erfassten Versagenskörpergeometrie und
- Variante 2: Ersatzkörpergeometrie auf Grundlage der Verteilung des kritischen hydraulischen Gradienten  $i_{krit}$ .

Bei beiden Varianten wurden außerdem zusätzlich Reibungskräfte berücksichtigt. Die beste Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen ergab sich für eine Ersatzkörpergeometrie entsprechend Variante 2.

Um die mechanische Wirkung eines Auflastfilters grundlegend zu analysieren, wurden in einem weiteren Schritt vereinfachte, eindimensionale Durchströmungsversuche durchgeführt. Dabei wurde eine

zylindrische, mit einem Auflastfilter belastete Bodenprobe vertikal von unten nach oben durchströmt (Bild 3). Verwendet wurden die Böden aus der ersten Versuchsreihe sowie als weitere Abstraktion aus Glaskugeln bestehende Körnungen. Auch bei diesem Versuchsaufbau wurden Porenwasserdrücke, Hebungen des Auflastfilters und der Durchfluss erfasst.

Dabei war geplant, die Glaskugelmodellversuche durch numerischen Berechnungen mittels Particle Flow Code (PFC) in Verbindung mit Coupled Computational Fluid Dynamics (CCFD) im Abbildungsmaßstab 1:1 nachzusimulieren. Die gekoppelten Berechnungen für die hier verwendete Kugelanzahl haben sich jedoch als so rechenintensiv und störungsempfindlich herausgestellt, dass sie im Rahmen der Projektbearbeitung nicht realisiert werden konnten. Die Berechnungen wurden daher mit einer verringerten Anzahl an Elementen durchgeführt, wodurch jedoch Modelleffekte zu berücksichtigen sind und eine repräsentative Abbildung der Strömungs-Verformungs-Interaktion nicht mehr möglich war. Die Ergebnisse sind daher nur eingeschränkt aussagefähig.



*Bild 3: Versuchsaufbau der Zylinderdurchströmungsversuche*

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

In 2015 ist vorgesehen die mittels Particle Flow Code (PFC) und Coupled Computational Fluid Dynamics (CCFD) durchgeführten numerischen Simulationen der Zylinderdurchströmungsversuche zu beenden und danach den Abschlussbericht zu erstellen.

Laufzeit des Vorhabens: 2009 bis 2015.

#### **5 Literatur**

Odenwald, B; Herten, M. (2008): Hydraulischer Grundbruch: neue Erkenntnisse, Bautechnik 85/9, S. 585 – 595.

#### **6 Veröffentlichungen**

- Boley, C.; Schober, P. (2013):Hydraulisch verursachtes Versagen von Baugrubensohlen - hydromechanische Grundlagen und Bemessung, 20. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium
- Boley, C., Schober, P., (2013): Neue Erkenntnisse zum Versagen der Baugrubensohle durch hydraulischen Grundbruch. Beiträge zur 9. Österreichischen Geotechnik-Tagung. Wien, 24./25.01.2013
- Boley, C., Schober, P. (2013): Experimental Analysis on the Influence of Surcharge filters on safety Against Hydraulic Heave, 18. ICSMGE Paris, 02.-06.09.2013

- Schober, P. (2011): Hydraulic Heave at the Excavation Wall with Under-Flow of Small Embedded Depth and Filter Layers at the Excavation Side of the Wall, " Geotechnical Engineering: New Horizons, Proceedings of the 21st European Young Geotechnical Engineers' Conference, Rotterdam
- Schober, P., Boley, C. (2012): Fracture behavior of uniaxial flowed sand column with sur-charge filter, 2nd IAHR Europe Congress TUM, 27.-29.06.2012 Technische Universität München
- Schober, P., Boley, C. (2012): Research on safety the against hydraulic heave for excavation walls with under- flow of small embedded depth and filter layers. 12th Baltic Sea Geotechnical Conference, Proceedings (CD), Rostock, 31.05 – 02.06.2012, 7 S
- Schober, P., Boley, C., Odenwald, B., (2011): Hydraulic Heave Safety at Excavations with Surcharge Filters. 3rd International Symposium on Geotechnical Safty and Risk (ISGSR). 02. - 03. Juni 2011, Munich, Germany, S. 677 - 684
- Schober, P., Boley, C., Odenwald, B. (2011): Research on hydraulic heaves at excavations with sur-charge filters. 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE 2011), 12. - 15. September 2011, Athen, Griechenland, S. 575 - 580
- Schober, P.; Odenwald, B. (2012): Der Einfluss eines Auflastfilters auf die Bruchmechanik beim hydraulischen Grundbruch, BAWMitteilung, Bd. 95, S. 151-162
- Schober, P. (2014): Zum hydraulischen Grundbruch an Baugrubenumschließungen bei luftseitiger Sicherung durch einen Auflastfilter in nichtbindigen Böden, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Institut für Bodenmechanik und Grundbau

## Hydraulische Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser

Netzplan-Nr.: A39520370002

Projektleiter: Dr.-Ing. H. Montenegro, Abteilung Geotechnik, Referat Grundwasser (G3)

E-Mail: hector.montenegro@baw.de

### 1 Problemstellung und Ziel

Flussauen werden sowohl durch die Überflutungsdynamik als auch, mitunter bis weit ins Hinterland, durch die Grundwasserdynamik geprägt. Änderungen der Abflussverhältnisse oder des hydraulischen Anschlusses an der Gewässersohle, beispielsweise durch Anpassungsmaßnahmen, wirken somit unmittelbar auf das Grundwasserregime und letztlich auf den Wasserhaushalt der Aue. Die 2009 erfolgte Deichrückverlegung in Lenzen ermöglicht es, den Austausch zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser im Naturmaßstab zu beobachten und derzeit verwendete Modellansätze zur Quantifizierung des Austausches zwischen den Wasserkörpern kritisch zu überprüfen.

#### 1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Austauschprozesse zwischen Oberflächen- und Grundwasser werden in der Regel über großräumige Wasserbilanzen abgeschätzt, da die lokalen Austauschvorgänge messtechnisch sehr schwer zu bestimmen sind. Derzeitige Modellvorstellungen gehen von einem von der Potentialdifferenz  $\Delta h$  zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser abhängigen Wasseraustausch  $Q_L$  aus, der durch einen „Übergangswiderstand“ (Leakagekoeffizient  $\lambda$ ) gesteuert wird. Allerdings beobachtet man häufig unterschiedliche Leakageflüsse  $Q_L$  bei Infiltration und Exfiltration trotz identischer Potentialdifferenz  $\Delta h$ . Ferner gibt es Hinweise auf einen hysteretischen Verlauf der funktionalen Beziehung zwischen Potentialdifferenz und Leakagefluss im Auf- und Ablauf eines Hochwasserereignisses, was auf eine zeitliche Variabilität des Leakagekoeffizienten hindeutet.

#### 1.2 Bedeutung für die WSV

Aufgrund gestiegener Anforderungen an die Belastbarkeit von Prognosen der Auswirkungen von wasserbaulichen Unterhalts- und Ausbaumaßnahmen auf den ökologischen Zustand von Flussauen, ist ein besseres Verständnis der Austauschprozesse zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser sowie der Rolle von Unterhalts- und Ausbaumaßnahmen unerlässlich. Hierfür sind Naturmessungen des Wasseraustauschs zwischen den Wasserkörpern entscheidend.

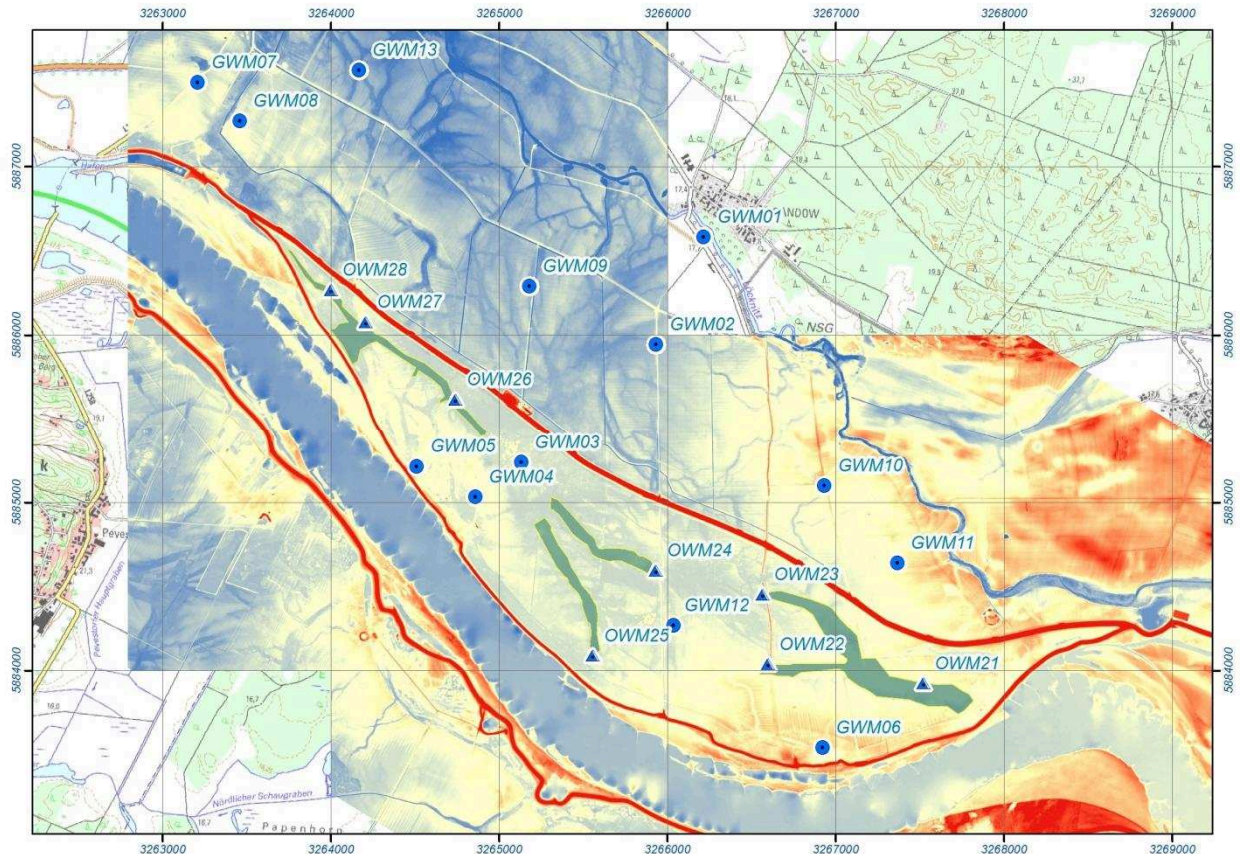
#### 1.3 Untersuchungsziel

Um das Prozessverständnis des Wasseraustauschs zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser zu vertiefen, wurden mit Unterstützung der Bundesanstalt für Gewässerkunde (KLIWAS Vorhaben 5.06 „Auswirkungen des Klimawandels auf die Vegetation der Flussauen“) und in Abstimmung mit dem BAW-Referat W2 Druckaufnehmer zur Erfassung räumlich und zeitlich hinreichend aufgelöster Wasserstände im Oberflächen- und Grundwasser installiert. Die Lage der Oberflächenwassermessstellen (OW) und der Grundwassermessstellen (GW) sowie das Relief im Untersuchungsgebiet (schwarze Berandung) sind in Bild 1 dargestellt. Die Wasserstandsmessdaten werden in einem Datenlogger gespeichert und, sobald die Wasserstände unter den Messstellenkopf abgefallen sind, per Funk übertragen.

### 2 Untersuchungsmethoden

Die Grundwasserströmung im Untersuchungsgebiet wurde auf Grundlage eines instationären 2D Finite-Elemente Modells für das Jahr 2012 untersucht. Nach erheblichen Vereinfachungen war das Grundwassermodell in der Lage, die generelle Grundwasserdynamik während des Überflutungsereignisses annähernd abzubilden, wenn auch an manchen Stellen die gemessenen Grundwasserstandsganglinien nicht über den gesamten Berechnungszeitraum zufriedenstellend wiedergegeben werden konnten. In wie weit die Diskrepanzen zwischen Messung und Modell eine Folge des verwendeten Speicher-Ansatzes zur Abbildung der Überflutung der Flutmulden ist, konnte nicht geklärt werden. Es

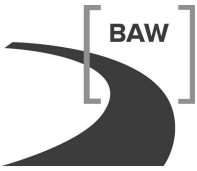
wurde letztlich klar, dass ein realistischerer Ansatz zur Beschreibung der simultan ablaufenden Strömungsvorgänge im Gewässer sowie im Grundwasser erforderlich ist.



**Bild 1:** Relief (rot: hoch, blau: tief) im Deichrückverlegungsgebiet Lenzen, Lage der Oberflächenwassermessstellen (Dreiecke) und Grundwassermessstellen (Kreise) sowie der Flutrinne (olivgrün) im Vordeichgebiet.

### 3 Ergebnisse

Nach intensiver Literaturrecherche sowie fachlichem Austausch kam man zu dem Schluss, dass für die Untersuchung der Austauschdynamik zwischen Oberflächen- und Grundwasser eine Modellkopplung zwingend ist. Für diese gekoppelte Strömungsberechnung wurde eine Vergabe der Forschungsleistungen durchgeführt, um die eine bessere Abbildung der Ein- und Ausströmungsdynamik und letztlich eine getreueren Abschätzung der In- und Exfiltrationsvorgänge zu erreichen. Vom Auftragnehmer DHI-WASY erfolgt die Kopplung durch Modellierung der Oberflächenwasserströmung mit dem Programmsystem MIKE11 (1D-HN-Modell) und der Grundwasserströmung mit dem Programmsystem FEFLOW (2D/3D-GW-Modell). Die Modellkopplung erfolgt hierbei bidirektional. Nach jedem Zeitschritt werden die Grundwasserzu- und -abflüsse, die mittels FEFLOW an den gekoppelten Randbedingungsknoten berechnet werden, werden zur Ermittlung der Oberflächenwasserströmung an das Programm MIKE11 als zusätzliche Randbedingung an den Berechnungsknoten (H-Punkte) weitergegeben. Mit diesen zusätzlichen Zu-/Abflussraten wird die Berechnung der Oberflächenwasserströmung mittels MIKE11 in internen Zwischenschritten so lange fortgeführt, bis der nächste Berechnungszeitpunkt für die Grundwasserströmung mittels FEFLOW erreicht wird. Die am Ende dieses Zeitschritts berechneten Oberflächenwasserstände werden nun an das Grundwassermodell in Form von Leakage-Randbedingungen zurückgegeben, worauf mittels FEFLOW die Grundwasserpotentiale für den nächsten Zeitschritt berechnet werden und die gekoppelte Berechnungsschleife von neuem beginnt. Eine Iteration innerhalb des Zeitschritts erfolgt nicht, was Anforderungen an die Zeitschrittlänge stellt.



#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Der für das Jahr 2014 vorgesehene Abschlussbericht konnte nicht fertiggestellt werden, weil für die als notwendig erkannte Modellkopplung die erforderliche Expertise nicht vorliegt. Es wurde daher ein Konzept zur vergleichenden Untersuchung unterschiedlicher Kopplungsansätze ausgearbeitet und extern (DHI-WASY) vergeben. Die Erstellung des Abschlussberichts ist nun in 2015 nach Beendigung der gekoppelten Oberflächenwasser- und Grundwasserströmungsberechnungen vorgesehen.

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2015.

#### **5 Literatur**

BAW-Mitteilungsblatt Nr. 97, Dezember 2013, Die Deichrückverlegung bei Lenzen an der Elbe.

#### **6 Veröffentlichungen**

Montenegro, H. (2013): Untersuchung des Wirkungszusammenhangs zwischen Abflussdynamik und Grundwasser. In: BAW Mitteilungsblatt Nr. 97, Die Deichrückverlegung bei Lenzen an der Elbe



**Kolmation als Schlüsselgröße der Wechselwirkung Oberflächenwasser – Grundwasser****Netzplan-Nr.:** A39520370003**Projektleiter:** Dipl.-Geol. D. Straßer, Dr.-Ing. H.J. Lensing, Abteilung Geotechnik,  
Referat Grundwasser (G3)**E-Mail:** daniel.strasser@baw.de, hoerby.lensing@baw.de**1 Problemdarstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Interaktion zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser wird neben den hydrogeologischen Randbedingungen maßgeblich durch die Gewässerstruktur, Substratzusammensetzung der Gewässersohle und der Ausbildung des Grundwasserleiters gesteuert. Hierbei ist die Kolmation einer Gewässersohle, d. h. alle Vorgänge die zu einer Reduktion des Porenvolumens, einer Verfestigung des Filtermediums und zu einer Durchlässigkeitsabnahme der Gewässersohle führen, als Schlüsselgröße zu sehen. Prinzipiell wird zwischen einer äußeren Kolmation, d. h. einer Ablagerung von Wasserinhaltsstoffen auf der Gewässersohle, einer inneren Kolmation, d. h. einem Eintrag und einer anschließenden Ablagerung von Wasserinhaltsstoffen in der Gewässersohle, sowie einer biologischen und physiko-chemischen Kolmation, d. h. einer Förderung der Kolmationsbildung durch biologische sowie physiko-chemische Prozesse, unterschieden. Dabei wird die Kolmation von Gewässersohlen von zahlreichen zeitlich und räumlichen variablen Einflussfaktoren beeinflusst.

Die komplexen Wirkungszusammengänge der verschiedenen Einflussfaktoren sind durch zahlreiche Forschungsaktivitäten bereits identifiziert und untersucht sowie in der Fachliteratur beschrieben worden. Jedoch sind bisher kaum Untersuchungen durchgeführt worden, die die besonderen Randbedingungen, die an Bundeswasserstraßen anzutreffen sind, entsprechend berücksichtigen. Dadurch ist eine belastbare Prognose von Auswirkungen, die durch wasserbauliche Maßnahmen bedingt sind, auf die Wechselwirkung zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser im Bereich der Bundeswasserstraßen nur unzureichend möglich.

Für die im Rahmen des FuE-Vorhabens relevanten Einflussfaktoren wurden Laborversuchen durchgeführt (SCHÄCHLI, 1993). Wie bereits BLASCHKE et al. (2003) feststellt, erfolgte jedoch bisher noch keine Verifizierung der Ergebnisse dieser Laborversuche anhand von Feldversuchen. Zudem gibt es auch kaum Untersuchungen die die für Bundeswasserstraßen charakteristischen Randbedingungen berücksichtigen (z. B. Geschiebemanagement, Einwirkungen durch schiffsinduzierte Strömungen, Einfluss wasserbaulicher Bauwerke, Einfluss von Hochwasserereignisse, Stauhaltung, etc.).

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Durch Unterhalts-, Ausbau und Renaturierungsmaßnahmen an Bundeswasserstraßen können die Wechselwirkungen zwischen Fließgewässer und dem angrenzenden Grundwasserkörper maßgeblich verändert werden. In Flussabschnitten mit einer naturnahen Wasserstandsdynamik lassen sich baubedingte Auswirkungen auf die quantitativen und qualitativen Grundwasserverhältnisse derzeit nicht mit der erforderlichen Genauigkeit prognostizieren. Diese Wissensdefizite führen bei verkehrswasserbaulichen Maßnahmen im Einflussbereich von aquatischen Ökosystemen, deren Schutz und deren Zustandsverbesserung als Ziel der EU-WRRL explizit formuliert sind, sowie im Einflussbereich konkurrierender Wassernutzungen (z. B. Uferfiltrat-fördernder Trinkwasserfassungen) zu einem erhöhten wasserwirtschaftlichen Konfliktpotenzial. Die fachlichen und juristischen Auseinandersetzungen bei der Bearbeitung aktueller Ausbauprojekte der WSV zeigen auf, dass insbesondere im Bereich grundwasserabhängiger Ökosysteme neben den naturschutzfachlichen Aspekten vor allem konkurrierende wasserwirtschaftliche Anforderungen für die Genehmigung maßgeblich sind.

**1.3 Untersuchungsziel**

Ziel dieses FuE-Vorhabens ist es, die einzelnen – für die Bundeswasserstraßen relevanten – Wirkungsfaktoren dieser komplexen Wechselwirkungen zu identifizieren und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Kolmationsprozesse näher zu bewerten. Ein weiteres Ziel des FuE-Vorhabens ist die Bewer-

tung verschiedener hydrogeologischer Methoden hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit und ihren Anwendungsgrenzen in Bezug auf die Kolmationsfragestellung. Dadurch soll zukünftig eine bessere Prognose und Bewertung der geohydraulischen Auswirkungen von wasserbaulichen Unterhalts- und Ausbaumaßnahmen mit der erforderlichen zeitlichen und räumlichen Auflösung ermöglicht werden, um wirtschaftlich und naturschutzfachlich optimierte Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen umsetzen zu können. Die Forschungsergebnisse bilden eine wichtige Grundlage um Flüsse, Seen und Kanäle als umweltverträgliche Verkehrswege zu erhalten und gleichzeitig eine Optimierung des ökologischen Zustands gemäß EU-WRRL (und damit assoziierte Umweltziele wie z. B. Erhaltung der Biodiversität usw.) zu erreichen und somit einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung der Bundeswasserstraßen leisten zu können.

## 2 Untersuchungsmethoden

Am Versuchsstandort Potsdam wurden im Zeitraum zwischen September 2012 und März 2013 zwei Transekte zur kontinuierlichen tiefenorientierten Untergrundtemperaturmessung installiert. Durch Verwendung der Temperatur als natürlichen Tracer können bevorzugte Infiltrationszonen in den Untergrund identifiziert und Infiltrationsgeschwindigkeiten sowie Verweilzeiten bestimmt werden. Der Sacrow-Paretzer-Kanal wurde hierfür gezielt als Versuchsstandort gewählt, da seit Mai 2013 bei Ausbauarbeiten die Sohle des Kanals vertieft wird. Hierbei wird die vorhandene Kolmationsschicht stark gestört und teilweise entfernt. Begleitet wird die Messung der tiefenorientierten Untergrundtemperatur durch Monitoring der Grundwasserstände und –temperaturen in 13 Grundwassermessstellen des WNA Berlin sowie der Stadtwerke Potsdam.

Ergänzend zu den Bodentemperaturmessungen sind in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) Untersuchungen des Sauerstoffisotopenverhältnisses in Niederschlag, Grundwasser und Oberflächenwasser geplant. Die hierfür erforderliche wöchentliche Grundwasserbeprobung wird seit März 2013 an 12 Grundwasser- und 2 Oberflächenwassermessstellen durchgeführt.

Bereits im Vorfeld der Ausbauarbeiten wurde der „Ist-Zustand“ der Gewässersohle durch eine flächendeckende Beprobung (Freeze-Core, Infiltrationsversuche) dokumentiert. Weitere Probenahmekampagnen werden begleitend zum Ausbau des Sacrow-Paretzer-Kanals durchgeführt um die Veränderung der Gewässersohle fortlaufend zu dokumentieren.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden darüber hinaus Grund- und Oberflächenwasser-Markierungsversuche durchgeführt. Die Ausführung erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Geowissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

## 3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Bodentemperaturmessungen im Bereich des Nedlitzer Durchstichs zeigen eine Infiltration von Oberflächenwasser in den Grundwasserleiter an (Bild 1). Die gemessenen Werte weichen deutlich von denen eines idealisierten Tiefenprofils der Bodentemperatur ohne Oberflächenwassereinfluss ab. Der hohe zeitliche Versatz des Durchschlags der Oberflächenwassertemperatur zum Messpunkt zeigt eine Kolmation des untersuchten Bereichs an. Nach Beginn der Baumaßnahmen im Mai 2013 hat dieser zeitliche Versatz deutlich abgenommen. Warmes Oberflächenwasser konnte im Sommer 2013 schneller in den Untergrund infiltrieren. Außerdem war ein signifikanter Anstieg des Grundwasserstands im kanalnahen Untergrund zu beobachten (Bild 2).

Die Ergebnisse der Gefrierkernprobenahmen wurden im Jahr 2013 in zwei Masterarbeiten dokumentiert. Durch ein auf die Gefrierkernprobenahme abgestimmtes Laborprogramm konnte die Anisotropie von Gewässersohlsedimenten räumlich hochaufgelöst und tiefenorientiert bestimmt werden.

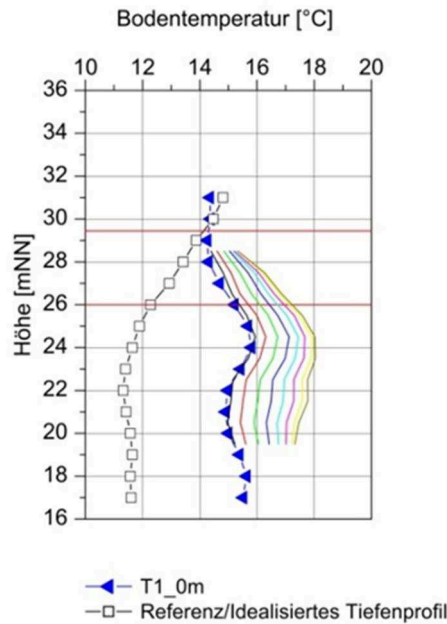


Bild 1: Ergebnisse der Bodentemperaturmessungen im Bereich Nedlitzer Durchstich



Bild 2: Differenz zwischen Oberflächenwasserstand und Grundwasserstand an Messstelle WNA07/10OP

**4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2015: Weiterführung der Feldarbeiten

Durchführung von einer Gefrierkernprobenahme zur Erkundung der Wiederherstellung der Kolmationsschicht

Aus- und Bewertung der Ergebnisse inklusive der Erstellung detaillierter Grundwasserströmungs- bzw. Transportmodelle in Zusammenarbeit mit dem Institut für Erd- und Umweltwissenschaften der Universität Potsdam

Erstellung mehrerer wissenschaftlicher Veröffentlichungen

2016 Erstellung eines Abschlussberichts.

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2016.

## 5 Literatur

- Blaschke, A. P., Steiner, K.-H., Schmalfluss, R., Gutknecht, D., Sengschmitt, D. (2003): Clogging Processes in Hyporheic Interstices of an Impounded River, the Danube at Vienna, Austria, Internat. Rev. Hydrobiol. 88, 397 – 413
- Brunke, M., Gonser, T. (1997): The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater, Freshwater Biology, 37, 1-33
- Mitchell-Bruker, S., Haitjema, H. M. (1996): Modeling steady state conjunctive groundwater and surface water flow with analytical elements – Water Resources Research, 32 2735 - 2732
- Schälchli, U. (1993): Die Kolmation von Fließgewässersohlen: Prozesse und Berechnungsgrundlagen – Technische Hochschule Zürich (VAW) Nr. 124

## 6 Veröffentlichungen

- Straßer, D., Lensing, H.-J., Richter, D., Frank, S., Goldscheider, N. (2014): Die Gefrierkernmethode - Weiterentwicklung des Erkundungsverfahrens zur geohydraulischen Charakterisierung von Sohlsedimenten, Ohde-Kolloquium, Vortrag, Dresden.
- Straßer, D. (2014): Gefrierkernprobenahme – Ein Erkundungsverfahren zur hydraulischen Charakterisierung von Sohlsedimenten, Tagung der FHDGG, Poster, Bayreuth.

**Bestandsaufnahme vorhandener Deckwerke****Netzplan-Nr.:** A39520410006**Projektleiter/in:** Dipl.-Ing. P. Fleischer, Dr.-Ing. J. Kayser, Abteilung Geotechnik,  
Referat Erdbau und Uferschutz (G4)**E-Mail:** petra.fleischer@baw.de, jan.kayser@baw.de**1 Problemdarstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die derzeitige Bemessung von Deckwerken aus losen oder teil- bzw. vollvergossenen Wasserbausteinen im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) erfolgt für Standardfälle nach dem „Merkblattes zur Anwendung der Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen“ (MAR), ansonsten nach den „Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen“ (GBB), die die theoretischen Bemessungsgrundlagen nach dem derzeitigen Stand der Technik beinhalten. Zur Erleichterung der Anwendbarkeit des GBB wurden die Berechnungsalgorithmen zusätzlich in einer Software „GBBSoft“ umgesetzt. Die überwiegend auf Erfahrungen beruhenden, parameterbehafteten Bemessungsansätze müssen jedoch weiter präzisiert werden. Dazu ist es erforderlich, verstärkt praktische Erfahrungen mit bestehenden Deckwerken zu sammeln, zu dokumentieren und systematisch auszuwerten, um auf dieser Grundlage die Bemessungsansätze zu validieren und kontinuierlich bedarfsgerecht weiterzuentwickeln. Aus diesem Grund wurde vor einigen Jahren mit einer umfassenden, langfristig angelegten Bestandsaufnahme vorhandener Deckwerken der WSV begonnen. Dabei werden möglichst viele unterschiedliche Wasserstraßenabschnitte hinsichtlich des Erhaltungszustandes der Deckwerke und des erforderlichen Unterhaltungsaufwandes unter Berücksichtigung der jeweils gegebenen Randbedingungen und der hydraulischen Belastung im Vergleich zu den theoretisch erforderlichen Deckwerksabmessungen begutachtet. Das Ziel besteht letztendlich darin, die Deckwerkbauweisen an Binnenwasserstraßen durch Präzisierung der theoretischen Grundlagen auf der Basis der Ergebnisse der Bestandsaufnahme sukzessiv weiter zu optimieren.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Einer hinsichtlich Standsicherheit und Kosten optimalen Bemessung der Deckwerke hinsichtlich der hydraulischen Belastungen infolge Schifffahrt kommt aufgrund des großen Investitionsvolumens bei Ufersicherungen in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes ein hoher Stellenwert zu.

**1.3 Untersuchungsziel**

Auf der Grundlage der Bestandsaufnahme von Deckwerken erfolgt für jeden Untersuchungsabschnitt eine vergleichende Dokumentation des ermittelten Soll- und Istzustandes der Deckwerke. Es werden Zustandsanalysen unter Berücksichtigung der konkreten geometrischen, geotechnischen und hydraulischen Randbedingungen sowie umfassende Schadensanalysen durchgeführt. Auf der Grundlage der Ergebnisse werden die bestehenden Berechnungsgrundlagen validiert. Das Vorschriftenwerk der WSV wird dementsprechend immer wieder angepasst, so dass die Deckwerke hinsichtlich Standsicherheit und Kosten laufend weiter optimiert werden können.

**2 Untersuchungsmethoden**

Folgende Untersuchungsmethoden kommen zur Anwendung:

- Erfassung des Aufbaus und Erhaltungszustandes der Deckwerke und der technischen Randbedingungen (z. B. Geometrie, Baugrund) in situ sowie des Unterhaltungsaufwandes in ausgewählten Wasserstraßenabschnitten,
- Durchführung von Naturmessungen in ausgewählten Wasserstraßenabschnitten zur Ermittlung der hydraulischen Uferbelastungen infolge Schifffahrt,

- Theoretische Berechnungen zur Ermittlung der erforderlichen Deckwerksabmessungen unter den ermittelten Randbedingungen unter Verwendung der Software GBBSoft, Vergleich mit den jeweils ermittelten Istzuständen,
- Auswertung der Ergebnisse, Validierung der Bemessungsansätze (GBB),
- Untersuchungen zu neuen Möglichkeiten der Erfassung des Zustandes des Deckwerks über und unter Wasser,
- Formulierung von Empfehlungen für eine optimale Bemessung und Ausführung von Deckwerken.

### 3 Ergebnisse

Bisher wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Deckwerke in 8 unterschiedlichen Abschnitten folgender Wasserstraßen begutachtet:

- Süd- und Nordstrecke des Dortmund-Ems-Kanals,
- Wesel-Datteln-Kanal,
- Main-Donau-Kanal,
- Mittellandkanal,
- Untere Havel-Wasserstraße.

Dabei handelte es sich um durchlässige Deckwerke überwiegend aus losen Wasserbausteinen, nur am Mittellandkanal wurden auch Deckwerke aus teil- und vollvergossenen Wasserbausteinen untersucht. Die Ergebnisse wurden ausgewertet und in Teilberichten dargestellt und bildeten u. a. die Grundlage für eine Optimierung der Bemessungsansätze des GBB. 2011 konnte eine überarbeitete Fassung des GBB veröffentlicht werden.

Die bisherigen Untersuchungen haben auch gezeigt, dass Echolot-Verkehrssicherungspeilungen, die bisher schwerpunktmäßig hinsichtlich Untiefen als Gefahr für die Schifffahrt ausgewertet werden, auch sehr gut zur Beurteilung der Deckwerksoberfläche hinsichtlich eines qualitätsgerechten Einbaus, aber auch langfristig hinsichtlich Deckwerksschäden herangezogen werden können. Das Merkblatt zur Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen MAR (2008) empfiehlt deshalb zum Nachweis einer qualitätsgerechten Deckwerksherstellung zusätzlich die Durchführung von Flächenpeilungen. Außerdem sollten die Verkehrssicherungspeilungen zukünftig insbesondere in Dichtungsstrecken regelmäßig auch hinsichtlich des Zustandes der Deckschichten ausgewertet werden, um Fehlstellen und eine mögliche Gefährdung der Dichtung rechtzeitig zu erkennen.

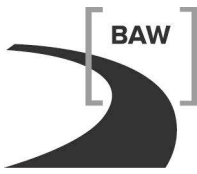
Aus Zeitgründen und aufgrund anderer Prioritäten mussten die Arbeiten im Rahmen des Forschungsprojektes von 2012 bis 2014 unterbrochen werden.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Folgende Arbeiten sind in den nächsten beiden Jahren vorgesehen:

- Durchführung weiterer Untersuchungen zur Zustandserfassung von Deckwerken unter Wasser,
- Auswertung der Messungen an der UHW,
- Bilanz der bis jetzt untersuchten Strecken mit einem Zwischenfazit, danach Entscheidung über die Untersuchungen an weiteren Strecken.

Auf dieser Grundlage werden die Ergebnisse aus dem FuE-Projekt schwerpunktmäßig hinsichtlich der Beurteilung der Notwendigkeit und der Bemessung von Ufersicherungen an Wasserstraßen mit geringem Verkehrsaufkommen ausgewertet. Das weitere Untersuchungskonzept soll dahingehend angepasst werden. Dabei sind verstärkt auch die Ergebnisse des Projektes „Entwicklung des Zustandes von Deckwerken bei Absenkung des technischen Standards“ (A39520470004) zu berücksichtigen. Aufgrund der z. T. langjährigen Beobachtung von Teilstrecken und zur Umsetzung des Untersuchungsprogramms unter den neuen Fragestellungen wird das Forschungsvorhaben noch ca. 2 Jahre in Anspruch nehmen.



Laufzeit des Vorhabens: 1999 bis 2016.

## **5 Literatur**

-/-

## **6 Veröffentlichungen**

Fleischer, P., Kayser, J. (2010) : Experience with revetments for inland waterways in Germany, 32. PIANC Congress, Liverpool, Großbritannien, 12. bis 14. Mai 2010.

## **Bemessung von geotechnischen Filtern unter instationärer Belastung**

**Netzplan-Nr.:** A39520410076

**Projektleiter:** Dr.-Ing. J. Kayser, Abteilung Geotechnik, Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

**E-Mail:** jan.kayser@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

In der Geotechnik werden Filter noch überwiegend nach geometrischen Kriterien bemessen, die an körnigen Materialien unter stationärer, einseitiger Durchströmung mit begrenzten hydraulischen Gradienten untersucht wurden. Unter dem Einfluss von Druckwechselbelastungen können hohe hydraulische Gradienten auftreten, welche insbesondere bei feinkörnigen Böden ohne Kohäsion zu Bodenverlagerungen führen können. Diese werden durch die gasförmigen Einschlüsse in den Poren und dem Porenwasser hervorgerufen, welche die Kompressibilität des Porenwassers signifikant verändern. Zur Beurteilung dieses Einflusses auf die Stabilität und Bemessung sowohl der geotextilen Filter als auch der Kornfilter fehlen derzeit noch eindeutige Kriterien.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Interaktion zwischen Filter und Boden wird an den Böschungs- und Sohlsicherungen der Bundeswasserstraßen im Unterwasserbereich maßgeblich von Wechselbelastungen bestimmt. Diese werden i. d. R. durch von der Schifffahrt induzierte Wellen hervorgerufen. Derzeit erfolgt die Filterbemessung für Kornfilter nach den Angaben des Merkblattes der BAW „Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen“ (MAK) und dem darin verwendeten Ansatz nach Cistin/Ziems. Hierbei ist jedoch noch weitgehend offen, inwieweit der Einfluss aus dynamischen Belastungen in den bestehenden Kriterien berücksichtigt werden muss oder ob vollkommen neu zu definierende Bemessungskonzepte für die geschilderte Fragestellung erforderlich sind.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, eindeutige Kriterien zur Beurteilung des Einflusses von Wechselbelastungen auf die Stabilität und Bemessung sowohl von geotextilen Filtern als auch von Kornfiltern zu erhalten.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Die Abteilung Erddamm- und Deponiebau des Instituts für Boden- und Felsmechanik (IBF) der Universität Karlsruhe (TH) hat von November 2003 bis zum Juni 2006 im Rahmen des FuE Vorhabens Versuche durchgeführt und die Versuchsergebnisse in einem Endbericht dokumentiert. Die hierbei angewendeten Untersuchungsmethoden wurden bereits erläutert.

Zur Untersuchung der hieraus abgeleiteten weiteren Fragestellungen wurde eine vollständige Überarbeitung der Wechseldurchströmungsanlage (WDA) erforderlich. Mit Hilfe der neuen Anlage können die üblicherweise an Wasserstraßen auftretenden hydraulischen Druckwechselbelastungen bei gleichzeitiger Durchströmung der Probe aufgebracht werden. Bei den in der Wasserstraße üblichen Drücken bis 4 m Wassertiefe entstehen hierbei Porenwasserüberdrücke. Wird hingegen dieselbe Druckwechselbelastung bei einem Druck von 50 m Wassertiefe aufgebracht, so wird die Bodenluft soweit komprimiert, dass nahezu keine Druckdämpfung mehr stattfindet und dementsprechend auch keine Porenwasserüberdrücke mehr entstehen. Zur Beurteilung dieses Effektes auf die Filterstabilität sollen Versuche auf unterschiedlichen Druckniveaus durchgeführt werden. Bild 1 zeigt die fertig aufgebaute WDA zusammen mit der Versuchszelle, die im Rahmen der Forschungsarbeiten „KOFIMARS - Grundlagen für die hydraulische Bemessung von Kornfiltern mariner Strukturen“ erstellt wurde.





Bild 1: Bild der neuen Wechseldurchströmungsanlage

### 3 Ergebnisse

Derzeit läuft eine Kooperation mit dem Leichtweißinstitut (LWI) der TU Braunschweig, in deren Rahmen das LWI die WDA mit Beteiligung der BAW für das Forschungsprojekte KOFIMARS zur Untersuchung von Filtern unter großer hydraulischer Belastung einsetzt. Hierfür wurden in 2014 umfangreiche Untersuchungen an der WDA durchgeführt. Ein Ergebnis ist in Bild 2 dargestellt. Es zeigt Vertikalverformungen an einem Filter-Basis-Aufbau unter verschiedenen hydraulischen Belastungen (Wellenhöhen 3,44 m / 5,73 m / 8,60 m). Die Instabilität für die größte Belastung (H = 8,6 m) ist anhand der kontinuierlichen Verformungen erkennbar.

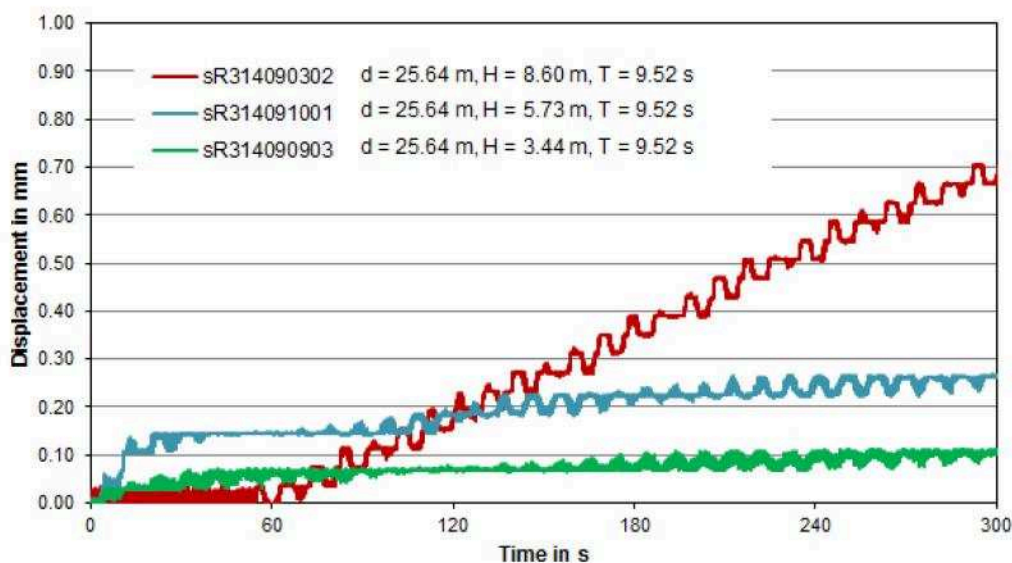
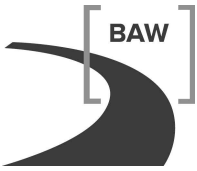


Bild 2: Vertikalverformungen am Filter-Basis-Aufbau unter verschiedenen hydraulischen Belastungen (Schürenkamp et al., 2014)

Die Untersuchungen werden derzeit vom LWI ausgewertet.



#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Nach der Auswertung der bereits in 2014 durchgeführten Versuche sind in 2015 weitere Versuche des LWI der TU Braunschweig zur Vervollständigung des Untersuchungsprogramms vorgesehen.

Die Versuche des LWI werden weiter begleitet und es ist der Bau eines eigenen Versuchsbehälters auf der Grundlage der Erfahrungen des LWI geplant. Für die Konzeption und Durchführung weiterer Versuche ist dann ein neues Forschungsvorhaben vorgesehen.

Laufzeit des Vorhabens: 2002 bis 2015.

#### **5 Literatur**

-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

Schürenkamp, D.; Oumeraci H.; Kayser, J., Karl, F. (2014): Numerical and laboratory experiments on stability of granular filters in marine environment, Proceedings of 34th Conference on Coastal Engineering, Seoul, Korea

## **Technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen – Quantifizierung ihrer Belastbarkeit und Möglichkeiten ihrer Anwendung an Binnenwasserstraßen**

**Netzplan-Nr.:** A39520410151

**Projektleiter/in:** Dipl.-Ing. P. Fleischer, Dr.-Ing. R. Soyeaux, Abteilung Geotechnik, Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

**E-Mail:** petra.fleischer@baw.de, renald.soyeaux@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Um die Ufer von Binnenwasserstraßen dauerhaft vor Erosionen und anderen negativen Auswirkungen der hydraulischen Belastung aus Schifffahrt zu schützen, werden diese in der Regel mit technischen Deckwerken aus Steinschüttungen oder Spundwänden gesichert. Anwendungsgrundlage ist ein breites Regelwerk der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Seit Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) im Jahr 2000 sind bei allen Aus- und Neubaumaßnahmen sowie Unterhaltungsarbeiten an Wasserstraßen neben den technischen Anforderungen auch ökologische Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Naturnähere Ufersicherungen unter Einbeziehung von Pflanzen sind als Alternative zur klassischen Steinschüttung gefragt. Für deren Einsatz an Wasserstraßen gibt es bisher allerdings noch zu wenig Erfahrungen und vor allem keine Regelwerke. Aus diesem Grund werden seit einigen Jahren in einem gemeinsamen Forschungsprojekt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Untersuchungen zur hydraulischen Belastbarkeit und ökologischen Wirksamkeit technisch-biologischer Ufersicherungen mit dem Ziel durchgeführt, Anwendungsempfehlungen und Bemessungsgrundlagen für deren Einsatz an Binnenwasserstraßen zu erarbeiten.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Mit den Untersuchungsergebnissen werden dem planenden Ingenieur der WSV sukzessiv fundierte Grundlagen zur Anwendung von technisch-biologischen Ufersicherungen zur Verfügung gestellt. Damit steht eine wichtige Entscheidungshilfe zur Verfügung, wenn im Rahmen von Unterhaltungs-, Ausbau- und Neubaumaßnahmen anstelle konventioneller naturnähere Ufersicherungsmaßnahmen mit Pflanzen angewendet werden sollen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Technisch-biologische Ufersicherungsarten, die sich aufgrund der Untersuchungen als geeignet für die Anwendung an Wasserstraßen erweisen, werden in einem Regelwerk zusammengestellt. Deren Belastbarkeit wird speziell hinsichtlich der besonderen Uferbelastungen infolge Schifffahrt quantifiziert. Dabei fließen auch die Ergebnisse des parallel laufenden Forschungsprojektes „Technisch-biologische Ufersicherungen – Theorie und Modellversuche zur Belastbarkeit“ (A39520470002) zur gleichen Thematik mit ein.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Da das Projekt eine Gemeinschaftsarbeit der Referate Erdbau und Uferschutz (G4, federführend) und Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W4) der BAW sowie der Referate Landschaftspflege/Vegetationskunde (U3) und Tierökologie (U4) der BfG ist, können sowohl technische als auch biologische Aspekte berücksichtigt werden. Folgende Untersuchungsmethoden kommen zur Anwendung:

- Sichten und Bewerten vorhandener Literatur und praktischer Erfahrungen erster lokaler Anwendungen in der WSV,
- Durchführung von Naturmessungen und Untersuchungen in bestehenden und neu anzulegenden Versuchsstrecken, Durchführung von Naturversuchen, Erfassung aller technischen und biologischen Randbedingungen einschließlich der hydraulischen Uferbelastungen infolge Schifffahrt,
- Begutachtung und Bewertung des Zustandes und der Entwicklung alternativer Ufersicherungen mit Pflanzen hinsichtlich Uferschutz sowie ökologische Bewertung der Vegetation und Fauna,

- Ermittlung der Belastbarkeit der in den Versuchsstrecken und Naturversuchen getesteten unterschiedlichen Ufersicherungsarten,
- Auswertung der Gesamtergebnisse, Formulierung von Empfehlungen und Bemessungsansätzen.

### 3 Ergebnisse

Alle bisher vorliegenden Ergebnisse sind auf dem zur Thematik der alternativen Ufersicherungen an Wasserstraßen eingerichteten Internet-Fachportal der BAW und BfG veröffentlicht (<http://ufersicherung.baw.de/de/index.html>). Der erste Bericht (BAW, BfG 2008) beinhaltet die Ergebnisse einer internationalen Literaturrecherche und einer Umfrage in der WSV zu bereits bestehenden ersten Erfahrungen mit alternativen Ufersicherungen. Im zweiten Bericht (BAW, BfG 2010) sind die Ergebnisse einer umfangreichen Detailuntersuchung in einer bereits vor etwa 20 Jahren angelegten Versuchsstrecke an der Mittelweser dargestellt. Die wichtigsten Ergebnisse aus beiden Berichten wurden außerdem in den BAW-Briefen 2/2006 bzw. 1/2011 veröffentlicht.

Einen Schwerpunkt der Arbeiten bildete auch 2014 der Naturversuch am Rhein (km 440,6 bis km 441,6), bei dem seit 2011 am rechten Ufer neun verschiedene technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen unter Wasserstraßenbedingungen getestet werden. Träger der Maßnahme ist das WSA Mannheim. In fünf Abschnitten wurde die vorhandene Steinschüttung oberhalb Mittelwasser entfernt und durch neue überwiegend pflanzliche Maßnahmen (Weidenspreitlagen, Röhrlichtgabionen, Steinmatratzen, Pflanzmatten) ersetzt. In einem Abschnitt blieb das Ufer weitestgehend ungesichert. In vier Abschnitten erfolgten ökologische Aufwertungen der weiterhin mit Wasserbausteinen gesicherten Böschung (Setzstangen, Faschinen, Busch- und Heckenlagen). In einem schriftlichen Bericht (BAW, BfG, WSA 2012) wurden die einzelnen Bauweisen dokumentiert und das Monitoringprogramm detailliert erläutert (Kurzfassung im BAW-Brief 5/2012). Die Monitoringergebnisse aus der kritischen Anfangszeit nach Bauabschluss wurden in einem ersten umfangreichen Bericht 2013 veröffentlicht (BAW, BfG, WSA, 2014).

2013/14 wurden die Monitoringaktivitäten in der Versuchsstrecke fortgesetzt und die Ergebnisse in einem weiteren Bericht (BAW, BfG, WSA 2014) dokumentiert. Im Juni 2013 trat das seit Einrichtung der Versuchsstrecke höchste Hochwasser auf, das die Uferböschung und das angrenzende Gelände mehrere Tage vollständig überflutete. Für alle Versuchsfelder blieb diese kurzzeitige Belastung ohne negative Folgen. Wesentlich stärker wirkte sich der 10-wöchige ununterbrochene Einstau des unteren Böschungsbereiches (bis etwa AZW + 1,50 m) im Frühjahr 2013 mit anschließender 8-wöchiger Trockenperiode auf die betroffenen neuen Ufersicherungsmaßnahmen aus. Auftrieb und Strömungen sowie gleichzeitige schiffsinduzierte Einwirkungen (Wellen und Strömungen) belasteten die Pflanzen sehr stark. Ein Ausfall von Pflanzen ist besonders in den Versuchsfeldern von hoher Relevanz, in denen die Steinschüttung entfernt wurde und die neuen pflanzlichen Sicherungen den Uferschutz gewährleisten müssen. Die bereits gut entwickelten Weidenspreitlagen (VF 2, 3) konnten diese Belastungen gut verkraften und den Uferschutz kontinuierlich gewährleisten. Einige Pflanzenarten in den Röhrlichtgabionen, z. B. Rohr-Glanzgras und Weißes Straußengras (VF 5), haben die lange Einstauphase dagegen nicht überstanden. Dadurch traten auch an den Gabionenkörpern selbst nach Versagen des Kokosgewebes erste Schäden auf. Die Uferstabilität ist jedoch durch das Eigengewicht der Gabionen bisher nicht gefährdet. Größere Schäden traten im lange eingestauten unteren Böschungsbereich bei den Pflanzmatten (VF 7) auf, begünstigt durch vorhandene Vorschäden. In diesem Bereich konnte der Uferschutz durch Ausfall der Pflanzen und zunehmende Beschädigung der Matten selbst nicht mehr ausreichend gewährleistet werden. Zur Sanierung erfolgte eine Überschüttung des gesamten unteren Böschungsbereiches bis AZW + 1,70 m mit Wasserbausteinen. Im selten eingestauten oberen Böschungsbereich haben sich die Pflanzmatten mit gleichem Aufbau 2013 dagegen weiter gut entwickeln können. Dementsprechend konnten bereits erste konkrete Erkenntnisse hinsichtlich der Anwendungsgrenzen dieser Ufersicherungsart (Pflanzmatten auf Filtermatten) an Wasserstraßen gewonnen werden.

Im Versuchsfeld 9, das ohne Uferschutz im Böschungsbereich blieb, haben die Erosionen durch die erstmalig sehr hohen, über die Oberkante des angrenzenden Geländes reichenden Überflutungen zugenommen. Die Abbruchkanten liegen jedoch noch in ausreichender Entfernung zum Betriebsweg, so dass keine konstruktiven Maßnahmen erforderlich wurden. In den Versuchsfeldern, in denen die alte Steinschüttung als Uferschutz erhalten blieb, entwickelten sich die eingebrachten Pflanzen wei-

terhin positiv. Die bisherigen Monitoringergebnisse wurden auf der HTG-Tagung 2014 in Berlin vorgestellt (Fleischer und Soyeaux, 2014). Eine endgültige Beurteilung der eingebauten technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen hinsichtlich Gewährleistung des Uferschutzes, Unterhaltungskosten und ökologischer Wirksamkeit ist erst nach mehreren Vegetationsperioden, frühestens 2016, möglich.

Nachdem die Ergebnisse der bisherigen Labor- und Modellversuche in einer Dissertation zusammengestellt und ausgewertet wurden (Eisenmann, 2015), sind ab 2015 Versuche im Rahmen einer weiteren Promotion vorgesehen. Dabei geht es schwerpunktmäßig um Fragen der Filterstabilität technisch-biologischer Ufersicherungen und um den Einfluss der Pflanzen auf die Strömungsgeschwindigkeiten – lokal hinsichtlich Erosion und großräumig hinsichtlich Hochwasserabfluss.

Auf der Grundlage der bisherigen Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt und insbesondere der Versuchsstrecke wurden 2014 Kennblätter zu drei Ufersicherungsarten mit Pflanzen fertiggestellt und als Arbeitsmittel für den planenden Ingenieur veröffentlicht: Weidenspreitlagen, Röhrichtgabionen und begrünte Steinschüttungen ([http://ufersicherung.baw.de/de/fuer\\_die\\_praxis/kennblaetter/index.html](http://ufersicherung.baw.de/de/fuer_die_praxis/kennblaetter/index.html)). Kennblätter zu weiteren Bauweisen sind vorgesehen. Seit Oktober 2014 steht als weiteres Arbeitsmittel das DWA-Merkblatt M519 „Technisch-biologische Ufersicherungen an großen und schiffbaren Gewässern“, an dem Vertreter des Forschungsprojektes seit 2008 mitgewirkt haben, als Gelbdruck zur Verfügung. In einem BAW-Brief (Fleischer, 2014) wird gezeigt, wie auf der Grundlage der bisherigen Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt unter Nutzung des DWA-Merkblattes zum jetzigen Zeitpunkt auf der sicheren Seite technisch-biologische Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen geplant werden können.

Um einen breiten Erfahrungsaustausch über bereits angewendete technisch-biologische Ufersicherungen innerhalb der WSV zu ermöglichen, erfolgte 2014 die Auswertung einer ersten Umfrage zu seit 2008 realisierten Maßnahmen an Wasserstraßen. Ein ergänzender Fragebogen wurde erarbeitet, der die bisherigen Angaben zur besseren Einordnung und Beurteilung weiter präzisieren soll. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse auf dem Internetportal der BAW und BfG ist 2015 geplant.

Zur Förderung des internationalen Austausches hat am 5.11.2014 ein sehr interessanter Erfahrungsaustausch zwischen BAW/ BfG, Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) Berlin und Deltares Utrecht in Koblenz stattgefunden. Im Mittelpunkt der Vorträge und Diskussionen standen Renaturierungsmaßnahmen an großen Flüssen sowie Themen zu naturnahen Ufersicherungen und Parallelwerken, Anbindung von Nebenarmen, Vegetation und Hochwasserschutz und ökologischen Bewertungen. Fachliche Kontakte wurden hergestellt, mehr Austausch und Zusammenarbeit vereinbart. Als wichtige Grundlage für weitere internationale Kontakte wurden 2014 dreisprachige Fachwortlisten (deutsch, englisch, französisch) zur Gesamtproblematik naturnaher Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen auf dem Internetportal zur Verfügung gestellt. ([http://ufersicherung.baw.de/de/fuer\\_die\\_praxis/fachwortlisten/index.html](http://ufersicherung.baw.de/de/fuer_die_praxis/fachwortlisten/index.html))

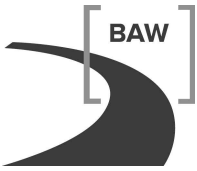
#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Das Monitoring im Rahmen des Naturversuchs am Rhein wird zunächst bis 2016 weitergeführt. Die Ergebnisse und Bewertungen werden in einem Abschlussbericht dokumentiert. Parallel dazu werden die Untersuchungen in weiteren ausgewählten Wasserstraßenabschnitten mit alternativen Ufersicherungen fortgesetzt. Zusammen mit den Erkenntnissen aus den bisherigen und ab 2015 neu vorgesehenen Labor- und Modellversuchen werden für Binnenwasserstraßen fundierte Anwendungs- und Bemessungsempfehlungen für technisch-biologische Ufersicherungen erarbeitet. Insgesamt wird das Forschungsvorhaben noch mindestens 3 Jahre in Anspruch nehmen.

Laufzeit des Vorhabens: 2004 bis 2017.

#### **5 Literatur**

-/-



## 6 Veröffentlichungen

BAW, BfG, WSA (2014): Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, 3. Zwischenbericht, Monitoringergebnisse 2013, 18.08.2014

Fleischer, P., Soyeaux, R. (2014): Ufersicherungen mit Pflanzen an großen Schifffahrtsstraßen - Erste Ergebnisse zur Stabilität aus einem Naturversuch am Rhein, HTG-Tagung 2014, Tagungsunterlagen

Fleischer, P. (2014): Standsicherheit und Bemessung technisch-biologischer Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen – Wo stehen wir 2014? BAW-Brief 2/2014

Eisenmann, J. (2015): Weidenspreitlagen an Binnenwasserstraßen, Untersuchungen zur geotechnischen Standsicherheit, Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien

Weitere Veröffentlichungen unter <http://ufersicherung.baw.de/de/publikationen/vortraege/index.html>

**Filterstabilität grober Gesteinskörnungen****Netzplan-Nr.:** A39520470001**Projektleiter:** Dr.-Ing. J. Stein, Abteilung Geotechnik, Referat Erdbau und Uferschutz (G4)**E-Mail:** juergen.stein@baw.de**1 Problemdarstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Eine Standard Bauweise zur Sicherung der Böschungsufer an den Bundeswasserstraßen ist die Schüttung loser Wasserbausteine auf einem Kornfilter. Um eine langfristige Deckwerksstabilität zu gewährleisten, muss die Körnungslinie des Kornfilters auf die Größe der Deckwerkssteine abgestimmt sein. Der feinkörnigere Kornfilter darf nicht durch Kontakterosion in die Poren der Deckschicht eindringen. Gleichzeitig muss er den darunter anstehenden Boden zurückhalten.

Die hydraulischen und mechanischen Vorgänge bei der Durchströmung der Deckwerke durch die Wellenbelastung aus der Schifffahrt sind weitestgehend unbekannt und sollen mit diesem FuE-Vorhaben untersucht werden. Mit Hilfe der Erkenntnisse sollen die aus der Literatur bekannten Filterregeln auf sehr grobe Gesteinskörnungen erweitert oder ggf. neue Regeln formuliert und auf die Bemessung von Filterstufen für die Wasserbausteinklassen der TLW (2003) angewendet werden.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Deckwerke sind ein großes Anlagevermögen der WSV. Durch die Ergebnisse der Untersuchungen soll die Bemessung der Deckwerke optimiert und die Unterhaltungsaufwendungen minimiert werden. Mit den Untersuchungen können die Einflüsse der Schifffahrt auf die Deckwerke genauer bestimmt werden. Die Entwicklung eines neuen und auf die groben Gesteinskörnungen angepassten Berechnungsansatzes zur Bemessung der Kornfilter gegen Kontakterosion führt zu einer sichereren und wirtschaftlicheren Durchführung von Baumaßnahmen an den Bundeswasserstraßen.

**1.3 Untersuchungsziel**

Ziel der Untersuchungen ist die Erforschung der hydraulischen und mechanischen Prozesse in Filter und Deckwerk an den Ufersicherungen der Binnenwasserstraßen. Im ersten Versuchsstadium soll gezeigt werden, inwieweit in einem großmaßstäblichen Modellversuch mit einem realitätsnahen Deckwerk eine Abbildung der welleninduzierten Strömungsprozesse und Deckwerksverformungen möglich ist. Darauf aufbauend sollen Filterregeln für sehr grobe Gesteinskörnungen entwickelt und auf die Bemessung neuer Filterstufen für die neuen Wasserbausteinklassen der TLW (2003) angewendet werden.

**2 Untersuchungsmethoden**

Zur Erfassung der komplexen Strömungsverhältnisse und der daraus resultierenden Deckwerksverformungen werden wirklichkeitsnahe Modellversuche auf dem BAW Gelände durchgeführt. Bei einem Versuch wird ein Deckwerk bestehend aus Wasserbausteinen mit darunter liegendem Kornfilter in den Probekasten eingebaut. Der Deckwerksaufbau entspricht einer Standardbauweise nach MAR (2008). Dieser wird in einem Tauchbecken auf dem BAW Gelände zur Simulation der Strömungs- und Wellenbelastung mit Hilfe eines Mobilkrans zyklisch auf und ab bewegt. Beim Eintauchen und Ziehen des Kastens werden der Filter und die Deckschicht durchströmt. Es wird sowohl filterstabiles als auch nicht filterstabiles Material untersucht.

Zur Erfassung der periodischen Änderungen der Drücke und Strömungsgeschwindigkeiten ist das Deckwerk in mehreren Ebenen mit Porendruckgebern, Erddruckkissen und Sonden zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit bestückt. Zur Begutachtung der Verformungen und Umlagerungen von Filtermaterial und Wasserbausteinen kann der Kasten nach den Versuchen an zwei Seitenwänden geöffnet werden. Zusätzlich hat er Sichtfenster zur Beobachtung von Umlagerungen an der Schicht-

grenze zwischen dem Filter und den Wasserbausteinen während des Versuchs. Die Verformungen an der Deckwerksoberfläche werden photogrammetrisch aufgenommen.

Für die Verifizierung der Messergebnisse sind Messungen in situ vorgesehen. Dafür kann der beschriebene Versuchskasten verwendet werden oder alternativ werden in ein Böschungsdeckwerk Porendruckgeber eingebaut.

### 3 Ergebnisse

In 2014 wurden die im Tauchbecken der BAW durchgeführten Versuche ausgewertet. Bei allen Versuchen war ein 70 cm dickes Deckwerk aus 40 cm Wasserbausteinen CP<sub>90/250</sub>, unterlagert von einer 30 cm dicken Filterschicht, eingebaut. Die Filterkörnungen wurden variiert (Splitt 2/16mm, Splitt 16/32 mm und Kies 2/63 mm). Bei jeder Versuchsserie wurde der Versuchskasten 100-mal zyklisch eingetaucht. Nach festgelegten Intervallen wurden die Änderungen der Lagerungsdichten, die Oberflächensetzungen und die Eindringung des Filters in die Deckschicht bestimmt. Die Strömungsgeschwindigkeiten wurden kontinuierlich aufgezeichnet. Entsprechend sind die nachstehend beschriebenen Auswertungen in Verformungsbeobachtungen und Hydrodynamik unterteilt.

Verformungsbeobachtungen:

Für alle Versuche wurde die Filterstabilität berechnet. Beim Ausbau wurden vom Filter aus 3 Tiefenlagen Siebproben zur Bestimmung von Änderungen in der Kornverteilung entnommen. Tendenziell wird das Material nach oben hin feinkörniger. Bei allen Versuchen konnte ein Materialtransport des Filters in die Wasserbausteine beobachtet werden. Zusätzlich wurde eine Setzung der Oberfläche der Deckschicht gemessen.

Beim feinkörnigsten Filtermaterial Splitt 2/16 mm kam es zum Kollaps. Der Splitt filtrierte in die Matrix der Wasserbausteine. Gleichzeitig sanken mit steigender Zyklenzahl die Wasserbausteine in die Filterschicht. An den Kastenecken wurde das Material nach oben ausgespült. Das Verformungsverhalten bestehend aus Oberflächensetzungen, Filtereindringung und Änderung der Lagerungsdichte wurde ausgewertet und grafisch dargestellt.

Hydrodynamik:

In Bild 1 ist beispielhaft ein Zyklus mit Eintauch-, Ruhe- und Auftauchphase an Hand der Messergebnisse der Tauchpegel, und Porendruckgeber sowie der Delft-Geschwindigkeitssonde dargestellt. Für die Auswertung werden einzelne Messzyklen betrachtet und die Maxima ausgelesen. Über die Porosität wurden die mit der Delft-Sonde gemessenen Abstandsgeschwindigkeiten in Filtergeschwindigkeiten umgerechnet. Die Werte wurden mit Hilfe der Geschwindigkeitsmessungen der Flügelradsonden und der aus den Porenwasserdruckmessungen berechneten Wasseranstiegsgeschwindigkeiten verifiziert. Zur Beschreibung des Strömungsverhaltens wurden Reynolds- und Froude-Zahlen bestimmt.

Der Strömungsgradient wurde mit Hilfe der gemessenen Porenwasserdrücke und Strömungsgeschwindigkeiten bestimmt und mit rechnerischen Ansätzen nach Forchheimer (Chang, 2001) und Ergun (Herwig, 2008) verglichen.

Eine Parameterstudie mit Variation verschiedener physikalischer Parameter und Durchführung einer Dimensionsanalyse zur Bestimmung von maßgebenden Einflussfaktoren ist in Arbeit. Auf Grundlage der Auswertung der zeitlichen Änderung der Messergebnisse während der Belastungsfolge und Abgleich mit den Verformungen soll ein Erosionskriterium erstellt werden. Dafür wurden Kennwerte in Anlehnung an das Shields-Diagramm bestimmt und dargestellt. Für die hier untersuchten Materialien müssen die Grenzen für den Bewegungsbeginn des Sohlmaterials nach Shields (1936) neu ermittelt werden.



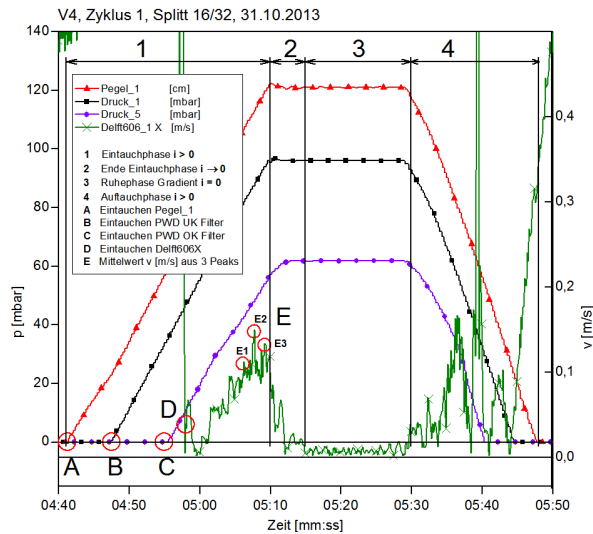


Bild 1: Phasenverlauf eines Tauchvorgangs, Auslesen von Messdaten für Druck und Strömungsgeschwindigkeit

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Um die Versuchsreihe abzuschließen werden weitere Versuche mit unterschiedlichen Materialien durchgeführt. Es ist geplant zur Verifizierung der Messergebnisse Naturmessungen an einer Kanalstrecke heranzuziehen.

- 2015:
- Durchführung weiterer Modellversuche
  - Weitere Auswertung der Versuchsergebnisse und Erstellung eines Erosionskriteriums
  - Ggf. Formulierung von weiterem Entwicklungsbedarf
  - Erstellung eines Abschlussberichtes

Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 2015.

#### 5 Literatur

- Chang (2001): Experimentelle Untersuchung zur freien Konvektion an Rohren in einer Kies/Wasserschüttung
- Herwig (2008): Strömungsmechanik: Einführung in die Physik von technischen Strömungen
- Shields (1936): Anwendung der Ähnlichkeitsforschung auf Geschiebebewegung. Peußische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau. Berlin 1936
- TLW 2003: Technische Lieferbedingungen Wasserbausteine

#### 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Technisch-biologische Ufersicherungen – Theorie und Modellversuche zur Belastbarkeit**

**Netzplan-Nr.:** A39520470002

**Projektleiterin:** Dipl.-Ing. P. Fleischer, Abteilung Geotechnik, Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

**E-Mail:** [petra.fleischer@baw.de](mailto:petra.fleischer@baw.de)

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Um die Standsicherheit technisch-biologischer Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen zu gewährleisten, müssen ihre Dauerhaftigkeit und die Belastbarkeit quantifizierbar sein. Es stellt sich die Frage, wie eine technisch-biologische Ufersicherung die Aufgabe eines rein technischen Deckwerks übernehmen kann: Eine Filterschicht wird benötigt, die den anstehenden Boden vor Erosion schützt. Daneben muss die Ufersicherung eine Lagestabilität gegenüber Strömungs- und Wellenangriff aufweisen. Die Böschung muss vor destabilisierenden Einwirkungen des u. U. auftretenden Porenwasserüberdrucks gesichert werden. So zielt die spezielle Fragestellung zum einen auf den Einfluss der technisch-biologischen Ufersicherung bzw. des durchwurzelterten Bodens auf dessen Festigkeit, Erosivität und Durchlässigkeit ab. Zum anderen darauf, wie die technisch-biologische Ufersicherung die Böschung vor Versagensmechanismen schützen kann, die durch den Porenwasserüberdruck initiiert werden.

Grundlage sind unter anderem die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt A39520410151 (siehe unter <http://ufersicherung.baw.de/de/publikationen/vortraege/index.html>). Erfahrungen zu den von technisch-biologischen Ufersicherungen aufnehmbaren Fließgeschwindigkeiten bzw. Schubspannungen liegen bisher nur für kleine Fließgewässer ohne Schifffahrt vor (Gerstgraser, C. (2000), Rauch, H.-P. (2006)). Die Ergebnisse sind nur bedingt auf Wasserstraßen übertragbar.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

In der WSV kommt der Gewährleistung der Standsicherheit der Ufer große Bedeutung zu. Da die natürliche Ufergestaltung von Binnenwasserstraßen mit Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie zunehmend an Bedeutung gewinnt, sollen verstärkt technisch-biologische Ufersicherungen zur Anwendung kommen. Für technisch-biologische Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen gibt es derzeit noch keine allgemeinen Bemessungsregeln. Die Untersuchungen sollen in Verbindung mit den Ergebnissen aus dem Forschungsprojekt A39520410151 eine Grundlage für die Entwicklung von Bemessungsregeln für technisch-biologische Ufersicherungen bieten.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel der Untersuchungen ist die theoretische und modelltechnische Erforschung der Wirkung technisch-biologischer Ufersicherungen hinsichtlich geotechnischer und hydraulischer Aspekte. Quantifizierungen der Belastungsresistenz technisch-biologischer Ufersicherungen gegenüber schiffsinduzierten hydraulischen Einwirkungen sollen stattfinden. Mit Hilfe von theoretischen Betrachtungen soll eine weitere Grundlage für Standsicherheitsnachweise geschaffen werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Hauptuntersuchungsmethoden sind Modell- und Laborversuche: Die Untersuchungen der geotechnischen Aspekte beinhalten die für die Standsicherheit der Uferböschung maßgebenden Festigkeitsparameter des durchwurzelterten Bodens. Auch der sich unter Absink ausbildende Porenwasserüberdruck, der u. a. von der Durchlässigkeit des Bodens abhängt, ist Untersuchungsgegenstand. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Erosionsstabilität des durchwurzelterten Bodens unter Wellen- bzw. Strömungsangriff. Unter den hydraulischen Aspekten wird die Reduktion von Strömungsgeschwindigkeiten und Wellenhöhen durch ingenieurbioologische Ufersicherungen erfasst.

In dem Wellenbecken der BAW (Bild 1) können großmaßstäblich Wellenbelastungen auf eine Uferböschung aufgebracht und technisch-biologische Bauweisen, wie z. B. Weidenspreitlagen oder vorgefertigte Elemente wie Vegetationsmatten, getestet werden. Einwirkungen wie Wellenhöhen, Absunkwerte, sich ausbildender Porenwasserüberdruck, lokale Strömungsgeschwindigkeiten werden gemessen und Widerständen wie z. B. der Scherfestigkeit der Boden-Wurzelmatrix gegenüber gestellt.

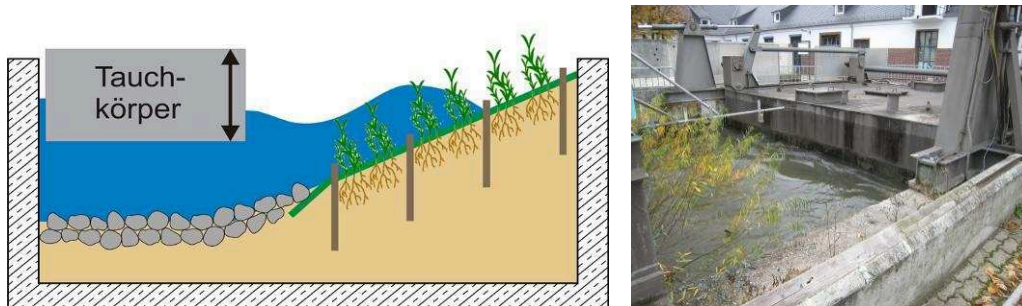


Bild 1: Systemskizze und Foto des Wellenbeckens mit einer technisch-biologischen Ufersicherung

### 3 Ergebnisse

2012 wurden Modellversuche mit Weidenspreitlagen als Ufersicherung im Wellenbecken der BAW auf einer 1:3 geneigten Böschung durchgeführt. Die 2011 eingebauten Spreitlagen aus Korb- und Purpurweiden wurden in 7 Messkampagnen nach einer Anwachszeit von 53, 63, 66, 70, 73 und 77 Wochen in mehreren Zyklen hydraulisch durch Wellen und Absunk belastet. Dabei wurde die Belastungsintensität langsam gesteigert. Eine Vielzahl von Messgrößen - Wasserspiegellagen, Wellen- und Absunkgrößen, Porenwasserdrücke im Boden in verschiedenen Tiefen unter den Weidenspreitlagen, Verformungen der Böschungsoberfläche (über Ketteninklinometer und selbst entwickelte Neigungsmessketten) - wurden aufgenommen. Im April 2013 wurde zum Abschluss der Versuchsserie mit den Weidenspreitlagen eine Dauerbelastung über mehrere Stunden mit maximal möglichen Einwirkungen durchgeführt. Die Spreitlagen konnten alle Belastungen ohne größere Schäden aufnehmen.

Parallel zu den Modellversuchen erfolgten Untersuchungen zum Wurzelwachstum der Weiden und zum Einfluss verschiedener Geotextilien auf das Wurzelwachstum. Dabei wurde festgestellt, dass sich bereits nach einer Vegetationsperiode ein relativ dichtes Wurzelwerk im Boden entwickelt. Nahe der Bodenoberfläche bildet sich ein sehr feines, fast flächiges System von Wurzeln, das vor Erosion schützen kann. Weiterhin zeigte sich, dass ein Kunststoffgeotextil mit  $300 \text{ g/m}^2$  Flächengewicht die Wurzelbildung nicht behindert. Das Schafwollvlies ( $450 \text{ g/m}^2$ ) hatte sich dagegen im Zeitraum von ca. 10 Monaten fast vollständig biologisch abgebaut. Aufgrund des sehr schnellen Abbaus ist es als temporärer Filter an Wasserstraßen nicht geeignet.

Um die Standsicherheit der Uferböschung mit Spreitlagen in Abhängigkeit vom Wurzelwachstum beurteilen zu können, wurde die Korrelation zwischen dem Durchwurzelungsgrad und der Scherfestigkeit des durchwurzelten Bodens untersucht und quantifiziert. Dazu wurden im März 2012 Weidenspreitlagen (Purpur- und Korbweide) in einzelnen 1 m hohen Versuchskästen mit einer Grundfläche von  $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$  eingebaut. Die Scherfestigkeit des durchwurzelten Bodens war nach 6 und 12 Monaten in verschiedenen Tiefen unter der Bodenoberfläche im Großscherversuch zu ermitteln (Bild 2). Vorher wurden umfangreiche Versuche im Großschergerät mit verschiedenen Böden ohne Wurzeln zur Festlegung der Versuchsdurchführung und -auswertung durchgeführt. Für die spezielle Fragestellung waren bauliche Veränderungen am Gerät erforderlich.

2013 wurden an den vorgezogenen Weiden Scherversuche in jeweils 3 verschiedenen Tiefen (15 cm, 45 cm und 75 cm unter der Oberfläche), separat für Purpur- und Korbweide, durchgeführt. Zur Ermittlung der Scherfestigkeitsparameter des durchwurzelten Bodens erfolgte das Abscheren bei verschiedenen Normalspannungen (25 kPa, 50 kPa, 75 kPa und 100 kPa).



**Bild 2:** Versuchskästen zur Anzucht von Weidenspreitlagen für Scherversuche und Großschergerät

Parallel wurde jeweils die Wurzelmasse pro Volumeneinheit bestimmt. Ein deutlicher Zusammenhang zwischen Durchwurzelungsgrad und Scherfestigkeit des Bodens wurde festgestellt. Mit zunehmender Tiefe unter der Oberfläche nehmen der Durchwurzelungsgrad und analog dazu auch die Scherfestigkeit des Bodens ab.

Alle Versuchsergebnisse wurden 2014 ausgewertet. Darauf basierend konnten erste Standsicherheitsnachweise für technisch-biologische Ufersicherungen entwickelt werden. Eine auf den Untersuchungsergebnissen basierende Dissertation „Weidenspreitlagen an Binnenwasserstraßen – Untersuchungen zur geotechnischen Standsicherheit“ wird Anfang 2015 von Frau Eisenmann an der Universität für Bodenkultur Wien eingereicht.

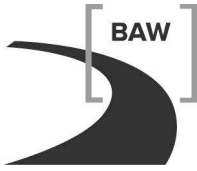
#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das Forschungsprojekt wird 2015 mit der Erstellung des Abschlussberichtes beendet.

Laufzeit des Vorhabens: 2008 bis 2015.

#### 5 Literatur

- Gerstgraser, C. (2000): Ingenieurbiologische Bauweisen an Fließgewässern - Grundlagen zu Bau, Belastbarkeit und Wirkungsweisen. Österreichischer Kunst- und Kulturverlag
- Rauch, H.-P. (2006): Hydraulischer Einfluss von Gehölzstrukturen am Beispiel einer ingenieurbiologischen Versuchsstrecke am Wienfluss. Dissertation. Universität für Bodenkultur Wien. Band 63. Gutmann-Peterson



## **6 Veröffentlichungen**

Eisenmann, J., Fleischer, P. (2012): Möglichkeiten und Grenzen pflanzlicher Ufersicherungen an Wasserstraßen. Johann-Ohde-Kolloquium, BAW-Mitteilungen Nr. 95

## **Erosion von Dichtungstonen und bindigen Böden unter Strömungsbelastung**

**Netzplan-Nr.:** A39520470003

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. (FH) A. Schneider, Abteilung Geotechnik,  
Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

**E-Mail:** achim.schneider@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

Mit Einführung der überarbeiteten ZTV-W, LB 210 im Jahr 2006 wurden gleichzeitig die Richtlinie zur Prüfung mineralischer Weichdichtungen im Verkehrswasserbau (RPW) zur Prüfung der Eignung von Erdstoffen zur Verwendung als Dichtungsbaustoff verankert. Zum Nachweis der Erosionsstabilität sind in dieser Richtlinie der Zerfallsversuch nach Endell und der Pin-Hole-Test aufgeführt. Für beide Verfahren gelten bisher keine wissenschaftlich abgesicherten Ausschlusskriterien. Ähnlich gelagerte Anwendungsfälle bzw. Materialuntersuchungen, z. B. aus dem Deponiebau liefern aufgrund der stark unterschiedlichen Einbausituation (Unter-Wasser-Einbau, Strömungsbelastung durch Schifffahrt bzw. auf Gewässersohlen) keine hinreichend übertragbaren Bewertungskriterien. Eindeutige und reproduzierbare Kriterien sind jedoch besonders im Hinblick auf länderübergreifende Ausschreibungsverfahren unerlässlich, um bei der Vergabe entsprechender Baumaßnahmen nachvollziehbare und gerichtlich nicht angreifbare Kriterien zur Verfügung zu stellen.

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Eine Prognose zum Erosionsverhalten bindiger Böden ist bei vielen geotechnischen und hydraulischen Fragestellungen eine notwendige Eingangsgröße zur Beurteilung der Auswirkungen der hydraulischen Belastungen auf den hiervon betroffenen Boden. Ebenso ist die labortechnische d. h. versuchstechnische Abbildung dieses Verhaltens eine nicht hinreichend gelöste Fragestellung. Aus der Literatur sind einige Ansätze wie der Zerfallsversuch nach Endell (1939) und auch der Pin-Hole-Test nach British Standards ASTM (2006) bekannt. Beide Versuche sind in Deutschland nicht genormt. Auch ist über die versuchsspezifischen Anwendungsgrenzen im Hinblick auf die zu untersuchenden Böden und bezüglich der Grenzwerte der möglichen hydraulischer Belastungen wenig bekannt. Eventuell wird es erforderlich sein, neue und besser geeignete Tests und Untersuchungsverfahren zu entwickeln.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Neben der Notwendigkeit eindeutiger Materialparameter für eine konfliktfreie Vergabepaxis ist die Frage nach der Erosionsstabilität von Dichtungsbaustoffen auch vor den Hintergrund immer enger werdender Haushaltsmittel beim Bau neuer bzw. bei der Unterhaltung vorhandener Wasserstraßen zu betrachten. Zukünftig kann es erforderlich werden, vorhandene Kanalstrecken mit höheren Schiffsgrößen bzw. Abladetiefen als ursprünglich geplant zu beanspruchen. Es ist zu befürchten, dass die dabei auftretenden höheren Strömungsbelastungen in bisher ungedichteten Kanalstrecken abhängig von der Erosionsneigung des ungeschützten bindigen Sohlmaterials bzw. der Tondichtungen zu Schäden führen. Um dieses Schadenspotenzial besser einschätzen zu können, sind entsprechende Kenntnisse und Untersuchungen zur Erosionsneigung der im Sohlbereich anstehenden Böden unerlässlich.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel der Untersuchungen ist die Definition einfacher Versuchsmethoden zur Beschreibung des Erosionsverhaltens bindiger Böden, mit denen es möglich sein soll, reproduzierbare Parameter zu ermitteln.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Zur Verifizierung und zur Feststellung der Reproduzierbarkeit der bisher verwendeten Versuche ist vorgesehen, im geotechnischen Labor der BAW Karlsruhe mehrere unterschiedlich plastische Böden, vordergründig Dichtungstone, hinsichtlich Zerfall und Erosionsstabilität nach den bisherigen Testver-

fahren der RPW zu untersuchen. Hierzu sind Reihenuntersuchungen zur Optimierung der Versuchsparameter wie z. B. Einwirkdauer, Strömungsgeschwindigkeit, Probengröße etc. erforderlich. Sollte sich keine oder eine nicht ausreichende Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse abzeichnen, so werden die Untersuchungen auf die Ermittlung des Einflusses weiterer möglicher Parameter (Mineralbestand etc.) ausgedehnt. Werden nach einer eventuellen Modifikation d. h. Verbesserung der Untersuchungsweise auch weiterhin keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt, folgt eine Erweiterung der Arbeiten auf die Entwicklung neuer Testverfahren. In diesem Zusammenhang wird beabsichtigt, das Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart mit entsprechenden Überströmversuchen zu beauftragen, da dort bereits aus vorhergehenden Studien eine entsprechende Versuchsanlage vorhanden ist.

### 3 Ergebnisse

In 2011 wurden erste Überströmversuche am Institut für Wasserbau in Stuttgart durchgeführt. In 2012 wurden in der BAW erste Vorversuche zum Zerfallsverhalten und zur Materialveränderung bzw. zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse durchgeführt. 2013 und 2014 wurden weitere Versuchsreihen (Zerfallsversuche nach Endell) mit Variation des Lagerwassers und der Materialfestigkeit ( $c_U$ -Festigkeit) durchgeführt. Es hat sich dabei gezeigt, dass die Art des umgebenden Lagerwassers (demineralisiertes Wasser oder gewöhnliches Leitungswasser) sowie die der Grad der Wasserentlüftung (Entgasung durch Kochen oder Vakuumentlüftung) die Zerfallsneigung des untersuchten Tones beeinflusst. Eine reproduzierbare Quantifizierung dieser Faktoren war jedoch nicht möglich. Es wurde vereinbart, durch unter Atmosphärenbedingung entgastes Leitungswasser (Lagerzeit 12 bis 16 Stunden) für die weiteren Untersuchungen zu verwenden. Aufwändiger entgastes Wasser (vakuumentlüftet bzw. längere Zeit gekochtes Leitungswasser) ergab keinen wesentlichen Vorteil hinsichtlich der Streuung der Zerfallsergebnisse.

Bei der Auswertung des zeitlichen Verlaufs der Zerfallsentwicklung hat sich gezeigt, dass schon geringe Änderungen der Raumtemperatur einen Einfluss auf die Anzeige der verwendeten Messwaagen nehmen. Bedingt durch die beim Zerfallsversuch zu messenden (geringen) Massenänderungen, hat sich die fehlende Temperaturkompensation der Messwaagen als entscheidende Fehlerquelle herausgestellt. Nachdem dieses erkannt wurde, wurden die Versuchsreihen unterbrochen und neue Waagen mit entsprechender Genauigkeit bzw. Temperaturkompensation beschafft. Die noch ausstehenden Versuche sollen in 2015 fortgesetzt werden.

Daneben wurden umfangreiche Umbauarbeiten an der vorhandenen Pin-hole-Anlage vorgenommen, Testversuche durchgeführt und Versuche im Rahmen des Forschungsvorhabens mit der modifizierten Versuchsanlage durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse mit der modifizierten Anlage deutlich verbessert werden konnte.

Ergänzend wurde zahlreiche Literatur zum Zerfall von Tonmaterial und zum Verhalten bei Durchströmung (Pin-Hole-Versuch) recherchiert. Eine Bewertung der Quellen steht noch aus.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

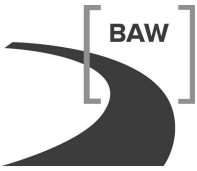
2015:

- Durchführung und evtl. Abschluss der Laboruntersuchungen
- Auswertung und Vergleich der Messergebnisse
- Eventuell Erweiterung des Versuchsprogramms auf andere Testverfahren
- Erstellung eines Abschlussberichtes
- Ggf. Formulierung von weiterem Entwicklungsbedarf

Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 2015.

### 5 Literatur

Endell, K., Loos, W., Breth, H. (1939): Zusammenhang zwischen kolloidchemischen sowie bodenphysikalischen Kennziffern bindiger Böden und Frostwirkung. Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Band 16, Volk und Reich Verlag, Berlin



ASTM D4647 (2006): Standard test method for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.08 ASTM International, West Conshohocken, PA, p.11.

## **6 Veröffentlichungen**

-/-



## **Entwicklung des Zustands von Deckwerken bei Absenkung des technischen Standards**

**Netzplan-Nr.:** A39520470004

**Projektleiter:** Dr.-Ing. J. Kayser, Abteilung Geotechnik, Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

**E-Mail:** jan.kayser@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Zur Förderung der Binnenschifffahrt in Deutschland ist es sinnvoll, eine weitestgehende Befahrbarkeit des Wasserstraßennetzes auch mit großen Binnenschiffen (GMS über 10 m Breite) zu ermöglichen. Dieses Ziel ist mit dem Ausbau vorhandener Wasserstraßen nach den „Richtlinien für Regelquerschnitte an Binnenschifffahrtskanälen“ des BMVBS mit Vertiefung, Verbreiterung und dementsprechend auch neuen, ausreichend bemessenen Böschungs- und Sohlensicherungen realisierbar. Dabei wird ein guter Standard für sichere, wirtschaftliche und unterhaltungsarme Deckwerke sowie hinsichtlich des Verhältnisses zwischen Gewässerquerschnitt und Schiffsgröße erreicht.

Aus ökologischen oder wirtschaftlichen Gründen ist dieser umfängliche Ausbau der Wasserstraßen jedoch nicht in allen Fällen sinnvoll oder durchsetzbar. Um trotzdem eine möglichst weitgehende Befahrbarkeit des Wasserstraßennetzes für große Binnenschiffe zu erhalten, wird zunehmend eine Absenkung des technischen Standards (Standardabsenkung) in Betracht gezogen. Diese Standardabsenkung führt zu verhältnismäßig kleinen Querschnitten (Gewässertiefen und/oder Breite), zu Einschränkungen von Fahr Situationen (Richtungsverkehr, Überholverbote) und zu - bezogen auf die gängigen Bemessungsregeln - unterdimensionierten Deckwerken. Die Standardabsenkung kann zur Überlastung der Wasserstraßen führen, was sich wiederum negativ auf die Sicherheit und Langzeitstabilität der Ufersicherungen, die größtenteils als Deckwerke ausgeführt werden, auswirkt. Derzeit gibt es kein Verfahren, mit dem die Auswirkungen einer Überlastung von Deckwerken auf deren Zustandsentwicklung bzw. den erforderlichen Unterhaltungsaufwand quantifizierbar wäre.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es ein Verfahren zu entwickeln, mit dessen Hilfe die Auswirkungen einer Standardabsenkung in der Wasserstraße auf die Standsicherheit und Langzeitbeständigkeit von Böschungs- und Sohlensicherungen projektspezifisch prognostiziert werden um dann über die technische und wirtschaftliche Notwendigkeit von Ausbau, Teilausbau oder Ertüchtigung von Ufersicherungen oder auch über verkehrliche Einschränkungen fundiert entscheiden zu können.

Deckwerke an Binnenwasserstraßen werden nach den „Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB)“ bemessen. Auf der Basis des GBB wurden die Regelbauweisen (MAR) entwickelt, die unter bestimmten Randbedingungen als standardisierte Bauweisen verwendbar sind. Die Standardbauweisen stellen einen ausreichenden Standard hinsichtlich der Belastbarkeit und der Langzeitbeständigkeit bei geringem Unterhaltungsaufwand dar. Wird dieser Standard abgesenkt, ist mit erhöhtem Unterhaltungsaufwand oder mit Uferabbrüchen zu rechnen. Hier ist eine differenziertere Betrachtung der technischen und wirtschaftlichen Folgen einer Standardabsenkung notwendig.

Die Kernfrage ist, wie sich unterbemessene Ufersicherungen mittel- und langfristig entwickeln werden. Bekannt ist derzeit nur, dass überlastete (unterbemessene) Deckwerke einen bis zu 8-fach höheren Unterhaltungsaufwand als normal belastete (standardgemäß bemessene) Deckwerke erfordern. Als wissenschaftliche Grundlage zur Bewertung der Belastung eignen sich die im GBB beschriebenen Bemessungsregeln.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Im Anlagevermögen der WSV sind ca. 20 Mrd. € in Ufersicherungen, ein großer Teil davon in Deckwerken enthalten. Ufersicherungen haben in Teilbereichen eine große Sicherheitsrelevanz.

Eine Standardabsenkung in der Ausführung von Ufersicherungen birgt daher große wirtschaftliche und technische Risiken. Die Abschätzung dieser Risiken ist eine wichtige Grundlage für Entscheidungen

hinsichtlich zulässiger Schiffsverkehre und/oder Investitionen in das Gewässerbett und dessen Sicherung.

### 1.3 Untersuchungsziel

Ziel der Untersuchungen ist die Entwicklung eines Verfahrens zur differenzierten Prognose des Zustands bzw. des Unterhaltungsaufwands für Deckwerke unter Berücksichtigung projektspezifischer Randbedingungen hinsichtlich der vorhandenen Ufersicherung und der hydraulischen Belastung. Die hydraulische Belastung wird wiederum maßgeblich durch der Geometrie des Gewässers und den Schiffsverkehr (Schiffsflotte, Fahrverhalten, Frequenz) bestimmt.

### 2 Untersuchungsmethoden

Für die Prognose von Bauwerkszuständen gibt es bereits verschiedene Verfahren. Für Deckwerke erscheint es sinnvoll, sich an Systemen der Fahrbahnunterhaltung für Straßen zu orientieren, die auf statistischen Verfahren basieren (Fastrich und Girmscheid, 2010). In Vorstudien hat sich gezeigt, dass hier Prognoseverfahren auf der Grundlage von Markov-Ketten unter Berücksichtigung der zufällig verteilten Einflussgrößen sinnvoll sind.

Die hierfür erforderlichen Basisdaten sollen über die Bemessung nach GBB mit der Software GBBSoft mit Monte-Carlo-Simulationen ermittelt werden. Die hydraulischen Belastungen, die Schiffsflotten und das Fahrverhalten der Schiffe sind hierfür statistisch zu beschreiben. Dies erfolgt zunächst beispielhaft an bereits vorhandenen Messungen an Wasserstraßen. Die dabei gewonnenen statistischen Modelle sollen möglichst allgemein formuliert werden, um auf zukünftige Projekte übertragbar zu sein.

Möglich ist auch die Beschaffung der Basisdaten aus einer Befragung von Experten aus der WSV und der BAW zu ihren Erfahrungen hinsichtlich der Entwicklung des Zustandes von Deckwerken (Delphi-Methode). Das Ergebnis der Befragung sollen Entwicklungskurven von Deckwerken unter verschiedenen Randbedingungen sein.

Eine erste Validierung dieser Basisdaten und des darauf basierenden Prognosemodells ist auf der Grundlage von Erfahrungen aus dem bereits seit längerer Zeit laufenden Forschungsvorhaben „Bestandsaufnahme Deckwerke“ möglich.

Durch gezielte Messungen insbesondere in der Natur sollen Lücken in den Basisdaten, die sich im Zuge der Modellerstellung zeigen, geschlossen und damit das Modell weiter entwickelt werden. Als Abschluss kann es sinnvoll sein, das Verfahren in eine Software zur projektspezifischen Prognose der Zustandsentwicklung von Deckwerken umzusetzen und so in der WSV-praxis eine gute Anwendbarkeit und Akzeptanz der Ergebnisse zu erreichen.

### 3 Ergebnisse

In 2013 wurden Untersuchungen angestellt, inwieweit sich ein Schiffsverkehr simulieren lässt. Datengrundlage dazu waren Messungen am DEK, WDK, der Berliner Nordtrasse und Silokanal. Die Simulation erfolgt in mehreren Schritten:

1. Auswertung des Schiffsverkehrs mit Feststellung von Korrelationen zwischen Ermittlung statistischer Kennwerte für die nachfolgenden bemessungsrelevanten Parameter
2. Simulation von 10.000 Schiffen auf der Grundlage der statistischen Verteilungen mit Hilfe von Zufallszahlen
3. Bemessung mit GGBSoft für die simulierten Schiffe
4. Vergleich der gemessenen und berechneten Bemessungsgrößen

Ein Vergleich der tatsächlichen mit den simulierten Heckwellen für einen Referenzabschnitt am Wesel-Datteln-Kanal zeigt Bild 1. Demnach ergibt die Simulation wesentlich größere Heckwellen als die Messungen. Das liegt zu einem großen Teil daran, dass die Berechnungen nach den Bemessungsregeln des GBB auf der sicheren Seite liegen.

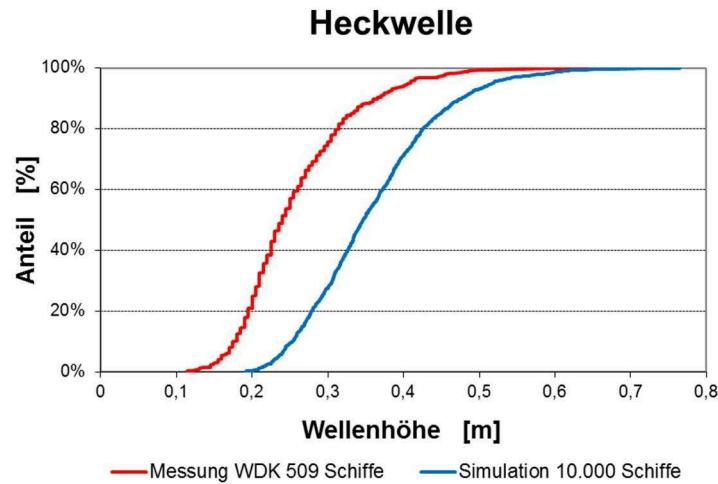


Bild 1: Gemessene und simulierte Höhen von Schiffsheckwellen

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Bemessungssoftware für Deckwerke GBBSOFT wird derzeit dahingehend weiterentwickelt, dass Verkehrssimulationen vereinfacht und automatisiert möglich sind. Das Verfahren zur Simulation, das bisher im Forschungsvorhaben entwickelt wurde, soll damit verbessert werden.

Im Rahmen des BMVI-Auftrags werden bis Ende 2015 weitere Daten zur Einwirkung auf Deckwerke und zum Deckwerkszustand erhoben, die im Rahmen des Forschungsvorhabens für die Weiterentwicklung der Vorhersage zur Zustandsentwicklung verwendet werden sollen.

Für die Umsetzung dieser beiden ergänzenden Arbeitsschritte wird das Forschungsvorhaben bis 2016 weitergeführt.

Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 2016.

#### 5 Literatur

Fastrich, A., Girmscheid, G. (2010): Optimierungsmodell – Probabilistische Optimierung des Straßenunterhaltung mittels Markov-Ketten und Monte-Carlo-Simulation, Bauingenieur, Band 85, S. 471 – 481

#### 6 Veröffentlichungen

Kayser, J. (2012): Dimensionierung von Ufersicherungen mit Deckwerken unter Beachtung der Belastungsintensität, Tagungsband „Johann-Ohde-Kolloquium“, BAW Mitteilungen Nr. 95, Karlsruhe

## **Numerische Simulation von hydraulisch induziertem Sedimenttransport in Erdbauwerken**

**Netzplan-Nr.:** A39520470005

**Projektleiterin:** H. Pfletschinger-Pfaff, Abteilung Geotechnik, Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

**E-Mail:** heike.pfletschinger@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Durchsickerung von Erdbauwerken aufgrund hydraulischer Potentialunterschiede beeinflusst deren innere und äußere Stabilität. Mögliche Versagensmechanismen resultieren u. a. aus Partikeltransport im Erdbauwerk, der zu einer Veränderung der Porenstruktur und somit zu einer Veränderung der hydraulischen und mechanischen Bodeneigenschaften führen kann. Die Nicht-Linearität und starke Kopplung der hydraulischen Transport- und damit induzierten Strukturänderungsprozesse erschweren eine numerische Berechnung und Prognose der inneren Standsicherheit von Erdbauwerken. Bisherige numerische Modelle beschreiben i.d.R. nur Teilprozesse oder spezielle, kontrollierte Laborversuche. Erprobte kommerzielle Programme mit gekoppelten hydro-mechanischen Berechnungen basieren meist auf der Finite Elemente Methode und sind damit in ihrer Anwendung auf Fragestellungen, die Porenstruktur und Einzelkorngefüge betreffen, eingeschränkt (z. B. Plaxis, Code Bright).

Zur Erweiterung bestehender kontinuumsmechanischer mathematischer Beschreibungen nach der Theorie Poröser Medien (TPM) (z. B. de Boer, 2000) wurden u. a. am Lehrstuhl Kontinuumsmechanik der Ruhr-Universität Bochum Ansätze entwickelt, in denen die poröse Struktur eines Bodenkörpers als Mehrphasenkontinuum dargestellt wird. Entsprechend der Problematik der Beschreibung von Erosionsprozessen umfasst das Modell eine erodierbare Phase, eine feste Phase, sowie eine Fluid-Phase und eine Suspensions-Phase (z. B. Steeb und Scheuermann, 2012). Die Mikrostruktur des Bodens wird hierbei durch eine volumetrische Quantifizierung der einzelnen Phasen auf die makrostrukturelle Betrachtung übertragen. In weiteren Arbeiten gilt es, diese Ansätze zu verifizieren und zu erweitern.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Eine zuverlässige numerische Darstellung gekoppelter hydraulischer und geomechanischer Prozesse in Erddämmen ergänzt bestehende Stabilitätsberechnungen und Filterbemessungsmethoden. Die Berücksichtigung der Mikrostruktur und kontinuumsmechanische makrostrukturelle Berechnungsansätze ermöglicht die Simulation einsetzender Erosionsprozesse mit bestehenden Finite Elemente Programmen unter Einsatz relativ niedriger Rechnerleistung.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel der Arbeit ist es, geeignete numerische Methoden zur Darstellung von Fluid-Festkörper-Interaktionen in Erdbauwerken unter hydraulischem Potential zu testen bzw. weiterzuentwickeln. Hierbei sollen insbesondere Prozesse des hydraulischen Materialtransports und resultierende Änderungen der hydraulischen und mechanischen Bodeneigenschaften anhand der Theorie Poröser Medien simuliert werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Es werden sowohl anhand von Literaturstudien, als auch durch praktische Tests verschiedene numerische Methoden auf ihre Eignung zur Darstellung gekoppelter hydro-mechanischer Prozesse in porösen Medien geprüft.

In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Kontinuumsmechanik der Ruhr-Universität Bochum werden bestehende mathematische Beschreibungen zur Simulation interner Erosion in Erdbauwerken anhand der TPM diskutiert, getestet und entsprechend der Fragestellung erweitert. Die Grundlagen der Methode liegen in der Erstellung eines thermodynamisch konsistenten Gleichungssystems unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Phasen eines Boden-Wasser-Gemischs. Zur numerischen Implemen-

tierung des mathematischen Konzeptes wird das Finite Elemente Programm COMSOL Multiphysics® verwendet. Bestehende und entwickelte Modellansätze werden anhand von Mess- und Erfahrungswerten aus Versuchen und der Praxis evaluiert. Zusätzlich werden zum besseren Verständnis von Materialeintrags- und Abtragsmechanismen in einer festen porösen Struktur porenskalige Mikrozellenversuche entwickelt und durchgeführt.

### 3 Ergebnisse

Nach Recherche für verschiedene numerische Methoden zur Eignung für die Darstellung gekoppelter hydro-mechanischer Prozesse in porösen Medien ist das vorgestellte Mehrphasenkonzept nach der Theorie Poröser Medien ein vielversprechender Ansatz und bildet den weiteren Schwerpunkt der Arbeit.

Das bestehende mathematische Modell wird bereits eingesetzt zur Simulation grundsätzlicher Prozesse der Infiltration (Schaufler et al., 2013). Da die an der BAW vorhandenen bodenmechanischen numerischen Simulationsprogramme Plaxis und Abaqus nicht zur Implementierung des gewählten mathematischen Ansatzes geeignet sind, wurde das Finite-Elemente-Programm Comsol Multiphysics® angeschafft. Innerhalb des mathematischen Moduls, in dem eigene partielle Differentialgleichungen implementiert werden können, wurde zunächst ein einfaches 2-Phasen-System zur Konsolidierung beschrieben.

Mit Implementierung des Erosionsmodells nach Steeb und Scheuermann (2012) in Comsol Multiphysics® wurden einfache 2-dimensionale Anfang-Randwertprobleme simuliert, um die Gültigkeit des mathematischen Modells zu testen. Mit zusätzlicher Implementierung eines linear-elastischen Bodensstoffgesetzes konnten die Abhängigkeiten der Primärvariablen des Modells nachvollzogen werden. Eine Parameterstudie verdeutlichte die hohe Sensitivität des im Modell implementierten Terms zur Simulation des Materialabtrags hinsichtlich der hydraulischen Leitfähigkeit des Materials.

Erste Simulationen zur Modellvalidierung anhand von Literaturdaten aus Permeameter-Versuchen (Moffat und Fannin, 2006) zeigten, dass insbesondere im Modell implementierte Konstitutivbeziehungen noch stark vereinfacht sind. Lokale Versagensmechanismen der Versuche konnten unter Berücksichtigung heterogener Anfangsbedingungen annähernd qualitativ und quantitativ nachvollzogen werden.

Die durchgeführten Mikrozellenversuche haben eine starke Abhängigkeit des Partikeltransports und der Partikelanhaftungs- sowie Blockierungsmechanismen in einer porösen Struktur von der strukturierten Tortuosität gezeigt. Die Versuchsergebnisse unterstützen die Verbesserung der im Modell implementierten Konstitutivbeziehung zur Beschreibung des Sedimenttransport und der Partikel-Struktur-Interaktion.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

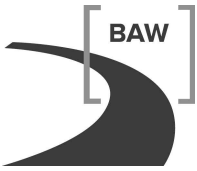
2015 (Januar bis März):

- Evaluierung der eingesetzten Methoden
- Formulierung für weiteren Entwicklungsbedarf
- Erstellung des Abschlussberichts

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2015.

### 5 Literatur

- de Boer, R. (2000): Theory of Porous Media. Highlights in the historical development and current state. Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- Moffat, R.; Fannin, R. J. (2006): A Large Permeameter for Study of Internal Stability in Cohesionless Soils. Geo-technical Testing Journal. Vol. 29(3):273-270.
- Schaufler, A.; Becker, C.; Steeb, H. (2013): Infiltration processes in cohesionless soils. Z. angew. Math. Mech., 93:138-146.



Steeb, H.; Scheuermann, A. (2012): Modelling internal erosion: A continuum based model enriched by microstructural information. Acta Geotechnica, submitted, 2012.

## **6 Veröffentlichungen**

Pfletschinger-Pfaff, H., Kayser, J., Steeb, H. (2014): Numerische Simulation von Suffosion. Tagungsband BAWKolloquium. Filter und hydraulische Transportvorgänge in Böden. 28. Januar 2014. Hannover.

Pfletschinger-Pfaff, H., Kayser, J., Steeb, H. (2014): Mehrphasen-Modell zur Simulation von Suffosion. Tagungsband des Ohde-Kolloquiums. 26. März 2014. Dresden. Mitteilungen - Institut für Geotechnik, Technische Universität Dresden. Band 19.

## **Statistische Auswertung von Erschütterungsemissionen**

**Netzplan-Nr.:** A39520570002 (alt: A39560610020)

**Projektleiter:** Dipl.-Phys. R. Zierach, Abteilung Geotechnik, Referat Baugrunderdynamik (BD)

**E-Mail:** rahula.zierach@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Messergebnisse von sachgemäß und im erforderlichen Umfang durchgeführten Erschütterungsmessungen stellen bei Kenntnis der eingesetzten Technik und Energie der Erschütterungsquellen ähnlich wertvolle Aufschlüsse wie Bohrungen oder Sondierungen für die untersuchten Baugrundbereiche dar. Diese Ergebnisse gilt es für weitere Aufgaben der WSV zu nutzen. Nutzbare Veröffentlichungen darüber sind kaum vorhanden, da diese Kenntnisse einen Teil des „Know-how“ der einschlägigen Institutionen ausmachen. Die BAW verfügt inzwischen über große Datenmengen von Erschütterungsmessungen bei Baumaßnahmen an Wasserstraßen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Auf Baustellen der WSV ist die Nutzung erschütterungsintensiver Bauverfahren wie Rammen, Vibrationsrammen, Vibrationsverdichten, Sprengen, Meißeln u. ä. nach wie vor unverzichtbar. Auf Grund der z. T. anzutreffenden Erschütterungsempfindlichkeit moderner Produktionsanlagen und zunehmender Sensibilität von Menschen in Wohngebäuden gegenüber Erschütterungen sind in der Vorbereitung von Baumaßnahmen immer häufiger auch erschütterungsärmere Schwingungsquellen wie z. B. Schiffs-, Baustellen- und Straßenverkehr zu berücksichtigen. Zuverlässige Erschütterungsprognosen können entscheidende Hinweise für die Auswahl zulässiger Bauverfahren, für die Fahrweise (z. B. Drehzahl von Vibrationsrammen) von Baumaschinen sowie für Art und Umfang von Beweissicherungsmaßnahmen bei erschütterungsintensiven Baumaßnahmen liefern.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

In dem FuE-Vorhaben sollen die in vielen Einzelaufgaben erarbeiteten und für Erschütterungsgutachten genutzten Messdaten der BAW in Abhängigkeit vergleichbarer Parameter aufbereitet und für Prognosen zur Verfügung gestellt werden. Ziel dieser Untersuchungen ist ein experimentell gesichertes Prognoseverfahren für Bauwerks-, Bauteil- und Bodenerschütterungen im Umfeld von erschütterungsintensiven Baumaßnahmen um eine Verbesserung der Zuverlässigkeit, Schnelligkeit und Anwendungsbreite künftiger Erschütterungsprognosen zu erreichen.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Die gesammelten Erschütterungsmessdaten von Rammungen, Sprengungen, Meißel- und Verdichtungsarbeiten u. a. werden in Abhängigkeit vom Abstand zur Erschütterungsquelle, von der eingesetzten Energie, von Boden- und Bauwerkseigenschaften sowie gegebenenfalls von weiteren Einflussgrößen, wie z. B. Bohlenlänge und Rüttelfrequenz statistisch ausgewertet. Die vorliegenden Messdaten werden zusammen mit den vorhandenen Angaben aller relevanten Parameter elektronisch archiviert, systematisiert und statistisch ausgewertet. Das Problem der Erschütterungsausbreitung wird dabei in drei Teilkomplexen untersucht, der Erschütterungserzeugung (System Baumaschine-Boden), der Erschütterungsausbreitung (System Boden-Boden) und der Erschütterungsübertragung (System Boden-Bauwerk-Bauteil). Dabei sollen sowohl allgemeine Zusammenhänge (z. B. Bauwerkserschütterungen pro eingesetztem Energiebetrag in Abhängigkeit vom Abstand, unabhängig von Bauwerksart und Baugrund) als auch detaillierte Zusammenhänge (z. B. Erschütterung je Energiebetrag in Abhängigkeit vom Abstand für schwere massive Bauwerke in Sandböden) herausgearbeitet werden. Im ersten Fall erhält man über den Mittelwert und die Standardabweichung einen schnellen Überblick über die im Mittel und mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (z. B. 95 % und 99 %) maximal möglichen Erschütterungen auch ohne Kenntnis des aktuell vorhandenen Baugrundes. Im zweiten Fall können bei Kenntnis bestimmter Parameter des Bauwerks und des Baugrundes genauere

re Angaben mit reduziertem Streubereich erhalten werden. Beide Fälle sind für die praktische Arbeit sinnvoll und notwendig.

### 3 Ergebnisse

Statistische Aussagen für die Schwingungsausbreitung aller gängigen erschütterungsintensiven Bauverfahren an Wasserstraßen liegen bereits vor. Hierin sind enthalten Analysen für Schlagrammungen von Spundwandelementen (Dieselrammen, Hydraulikrammen, Schnellschlagbäre) und Rammpfählen (Franki-Verfahren), Vibrationsrammungen (mit variablen und starren Unwuchten im Drehzahlbereich  $f = 16 - 40$  Hz), Spundwandarbeiten mit hydraulischen Pressen, Meißelarbeiten (Abriss- und Felsmeißeln), Verdichtungsarbeiten (Rüttelplatten, Rüttelwalzen, Rüttelstopfverdichtung), Auflockerungssprengungen und Abbruchsprengungen sowie Erschütterungen aus Schiffsverkehr und herab fallenden Massen.

Um die durch regelmäßige Messungen ständig wachsenden Datenbestände besser handhaben zu können, wurde eine Software für die Erfassung, Analyse, Archivierung und Prognose von Erschütterungsdaten erarbeitet. Inzwischen liegt die 10. überarbeitete Version dieser Software vor. Es sind Module für Schlagrammungen, Vibrationsrammungen, hydraulische Pressen, Meißelarbeiten, Verdichtungsarbeiten, Sprengungen sowie Erschütterungen aus Schiffsverkehr und durch herabfallende Massen enthalten. Die Erfassung und Auswertung von Messdaten konnte damit insbesondere hinsichtlich der Korrelationen zu Verfahrens-, Boden- und Bauwerksparametern deutlich verbessert werden. Die Prognose der Schwingungsausbreitung ist damit sehr schnell und unter Heranziehung einer wesentlich größeren Datenbasis als bisher möglich. Für die Beurteilung der Mess- bzw. Prognosegrößen sind Rechenmodule für Vergleiche mit den Anhaltswerten aus der DIN 4150 integriert. Neben den Rechenmodellen mit numerischer Ausgabe der Ergebnisse für unterschiedliche Erschütterungsausbreitungen und Quellen können die berechneten Ergebnisse graphisch dargestellt werden. Für die Verarbeitung externer Daten wurde ein Modul für den Datenimport und Export programmiert. Bei der Bearbeitung der aktuellen Aufgaben stellt das oben beschriebene Programm bereits eine wertvolle Hilfe bei der Auswertung von Erschütterungsmessungen und der Erstellung von Prognosen dar.

Im Jahr 2010/2011 wurden im Rahmen der Bautätigkeit des WSV sieben Proberammungen durch Schwingungsmessungen begleitet, bei denen am jeweils gleichen Standort verschiedene Rammhilfen getestet wurden. Dabei hat sich gezeigt, dass unter vergleichbaren Bedingungen (Rammelemente, Boden, Rammverfahren, Abstand) die Bodenschwingungen durch die Rammhilfen Vorbohren, Hochdruckvorschneiden und Niederdruckspülung nur sehr geringfügig (vernachlässigbar) beeinflusst werden. Im Bild 1 sind exemplarisch die Größtwerte der Bodenschwinggeschwindigkeit je Messpunkt und je gerammter Bohle bei Vibrationsrammung ohne Rammhilfe und mit Rammhilfe Vorbohren bei einer Proberammung dargestellt. Die Regressionskurven (Wellenausbreitung von Oberflächenwellen) bei der Verfahren liegen nahezu übereinander.

Mit den bisherigen Ergebnissen können Erschütterungsprognosen und die Auswirkungen von Erschütterungen für Planfeststellungsverfahren in vielen Fällen auch ohne kostenaufwändige Probemaßnahmen zuverlässig getätigt werden. Erschütterungsmessungen bei Bau- und Probemaßnahmen können mit Hilfe der entwickelten Software bereits vor Ort vorausgewertet werden so dass auf Anfragen von Ämtern zu Erschütterungsproblemen inzwischen wesentlich kurzfristiger reagiert werden kann.



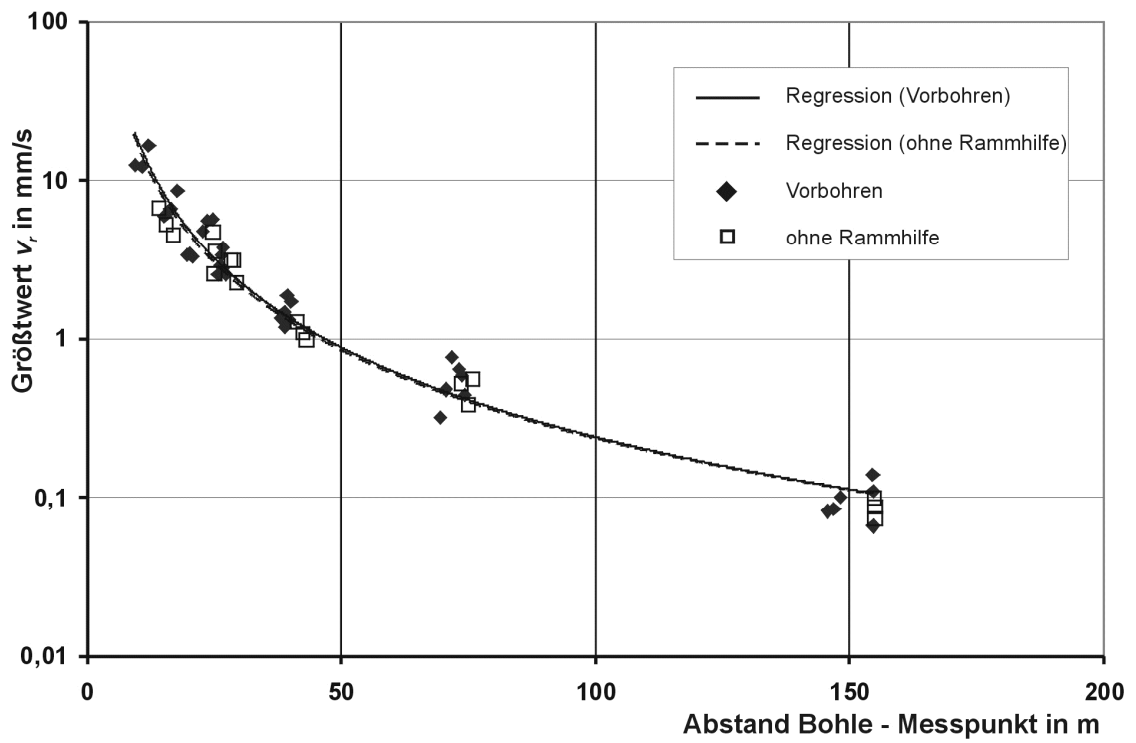


Bild 1: Größtwerte der Bodenschwingungen  $v_i$  je gerammter Spundbohle bei Vibrationsrammung

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Der Abschlussbericht wird in 2015 erstellt.

Laufzeit des Vorhabens 2001 bis 2015.

#### 5 Literatur

-/-

#### 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Bemessung korrodierter Stahlspundwände im Wasserbau**

**Netzplan-Nr.:** A39550110158

**Projektleiterin:** Dipl.-Geol. A. Heeling (Mitarbeiterin: Dipl.-Ing. (FH) A. Jakobs),  
Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Geotechnik Nord (K1)

**E-Mail:** anne.heeling@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Beurteilung des Korrosionszustandes einer Stahlspundwand erfolgt anhand der charakteristischen Werte der Korrosion „Mittlere Abrostung“ (→ Spannungsnachweis) und „Maximale Abrostung“ (→ Durchrostung), die sich derzeit zuverlässig nur mittels einer statistischen Auswertung von Ultraschall-Restwanddickenmessungen ermitteln lassen. Das Referat Geotechnik Nord hat dazu bereits in den 90er Jahren ein Verfahren zur Berechnung der Maximalen Abrostungen entwickelt.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Spundwände überbrücken Geländesprünge in Häfen und an Wasserstraßen und stellen daher ein im Zuständigkeitsbereich der WSV weit verbreitetes Bauteil dar, das wegen seiner statischen Funktion ständig hinsichtlich Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit zu beurteilen ist. Viele Spundwandbauwerke erreichen jedoch aufgrund lokaler Durchrostungen nicht die ursprünglich geplante Nutzungsdauer von 50 bis 80 Jahren. Darüber hinaus gibt es wirtschaftliche Bestrebungen „schlankere“, statisch höher ausgelastete Spundwandprofile einzusetzen, so dass eine Verminderung der Tragfähigkeit aufgrund korrosiver Wanddickenverluste von großer Relevanz ist.

Der zutreffenden Beurteilung des Korrosionszustandes auf Grundlage von Restwanddickenmessungen kommt somit eine hohe Bedeutung zu. Diese sind jedoch zeit- und kostenintensiv: Sie erfordern eine exakte Planung in Kenntnis der Örtlichkeiten. Die Vorbereitung (sorgfältige Reinigung der Messpunkte) und die Durchführung von Spundwanddickenmessungen erfolgen oft unter schwierigen Randbedingungen (Tauchereinsatz, strömendes bzw. trübes Wasser, Messeinsatz nahe intensiv genutzter Anlagen und bei Wellengang). Zudem gibt es zur Auswertung von Spundwanddickenmessungen auf dem freien Markt keine Standardsoftware; die BAW verwendet deshalb als Eigenentwicklung die Datenbankanwendung WaDiMe (= Wand-Dicken-Messung).

Für die WSV ist es von besonderem Interesse, den Aufwand bei der Durchführung von Restwanddickenmessungen zu verringern bzw. deren Aussagekraft zu vergrößern. Bisher werden Spundwanddickenmessungen von der BAW im Auftrag der WSV mittels Ultraschall durchgeführt. Zukünftig kann für bestimmte Ämter – mit Unterstützung der BAW – auch eine selbstständige Durchführung und Auswertung der Messungen oder eine Vergabe an (bisher auf dem freien Markt kaum vorhandene) qualifizierte Ing.-Büros sinnvoll sein.

Aus wirtschaftlicher Sicht wäre es zudem vorteilhaft, zukünftig das Abrostungsverhalten einer Spundwand aus Umgebungsparametern prognostizieren zu können.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das im Referat Geotechnik Nord erarbeitete Verfahren zur Berechnung der Mittleren Abrostung, welches auf Grundlage von Restwanddickenmessungen eine qualifizierte Beschreibung des Korrosionszustandes eines Spundwandbauwerkes zulässt, ist kontinuierlich weiterzuentwickeln. Dazu ist es auch erforderlich, das Vorgehen bei der Durchführung von Spundwanddickenmessungen mittels Ultraschall weiter zu optimieren sowie alternative Messverfahren zu testen.

Mittels statistischer Verfahren ist die Vorhersage des Abrostungsverhaltens aus einer Vielzahl von Einflussfaktoren zu ermöglichen:

- Physiko-chemische Eigenschaften des Immersionsmediums Wasser

- Physiko-chemische Eigenschaften des Spundwandstahls
- Mechanische Beanspruchung des Bauwerkes (z. B. Fenderreibung, Eisgang, Wellen)
- Mikrobiologische Prozesse

Einzelne Faktoren wirken jedoch nicht einheitlich korrosionsfördernd oder -hemmend, sondern stehen miteinander in Wechselwirkung. Ziel des FuE-Vorhabens ist deshalb ein tieferes Verständnis der Korrosionseinflussfaktoren und -mechanismen und deren Wechselwirkungen.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind in Form von anwenderfreundlichen Auswerteroutinen in die Datenbankanwendung WaDiMe einzubinden.

## 2 Untersuchungsmethoden

Das FuE-Vorhaben unterstützte das Projekt „Design Method for Steel Structures in Marine Environments Including the Corrosion Behaviour“ der EU, das von der BAW bis 2005 gemeinsam mit Partnern aus Italien, Luxemburg und Frankreich durchgeführt wurde. Die Untersuchungsmethoden wurden detailliert im Endbericht (European Communities, 2007) beschrieben.

Die WaDiMe-Programme wurden zwischen 2007 und 2014 weiterentwickelt. Die Programmierarbeiten wurden von Fa. Skill Networks, Hamburg, durchgeführt.

Es wurden alternative Verfahren zur Spundwanddickenmessung, die lt. Herstellerinformationen jeweils keine oder nur eine geringere Reinigung der Messstellen erfordern, auf ihre Praxistauglichkeit hin geprüft und bewertet

- In Zusammenarbeit mit der Fa. Applus RTD, Bochum, wurden Wanddicken-Vergleichsmessungen mittels Ultraschall und pulsierendem Wirbelstrom im Labor (2006) und vor Ort (2007 und 2008) durchgeführt.
- In Zusammenarbeit mit der Fa. Evologics, Berlin, erfolgten 2009 Vergleichsmessungen im Labor zur Beurteilung der Aussagekraft und Praxistauglichkeit des Ultrabreitbandsonar-Verfahrens.
- In Zusammenarbeit mit der Fa. Domeyer GmbH & Co. KG, Bremen (Cygnus-Vertriebshändler für Deutschland) wurde 2014 das speziell für den Tauchereinsatz entwickelte Gerät „Cygnus Dive“ der Fa. Cygnus Instruments, Dorchester (GB), zur Unterwasser-Ultraschall-Schichtdickenmessung mittels Mehrfachecho im Labor und vor Ort getestet.

## 3 Ergebnisse

Das ECSC-Projekt lieferte folgende Ergebnisse, die detailliert dem Endbericht (European Communities, 2007) zu entnehmen sind:

- In Zusammenarbeit mit der Fa. Statsoft Europe GmbH, Hamburg, wurde ein modifiziertes Berechnungsverfahren für die charakteristischen Kennwerte der Korrosion und ein Prognosemodell vorgelegt, wonach sich Mittlere Abrostungen mittels einer tiefenbezogenen Exponentialfunktion darstellen lassen:

$$\text{Mittlere Abrostung} = b_n \cdot e^{b_m \cdot \text{Tiefe}}$$

- Die Regressionskoeffizienten  $b_n$  und  $b_m$  lassen sich je Korrosionszone sowohl aus den Restwanddickenmessungen als auch aus Milieuparametern berechnen; die Tiefenangabe bezieht sich auf die die jeweilige Korrosionszone definierenden Wasserstände.
- Um die Aussagekraft von Spundwanddickenmessungen zu erhöhen, wurde deren Durchführung aus statistischer Sicht hinterfragt und modifiziert. Es wurden Empfehlungen zur erforderlichen Anzahl von Einzelmesswerten pro Korrosionszone und Bauwerk sowie zur Verteilung und Anzahl der Messquerschnitte längs der Höhe einer Spundwandbohle gegeben.
- Es wurde festgestellt, dass die bei Spundwanddickenmessungen beobachteten Löcher häufig keinen (statistischen) Bezug zu den gemessenen Restwanddicken haben. Diese „anomalen“ Löcher lassen sich deshalb (im Gegensatz zu den „normalen“) weder mittels einer statistischen Analyse aus den gemessenen Restwanddicken prognostizieren noch dürfen sie bei der Berechnung der statistischen Kennwerte der Korrosion berücksichtigt werden.

Diese Ergebnisse wurden

- 2005 im Rahmen des K1-Kolloquiums „Erfahrungsaustausch zur Planung, Bemessung und Ausführung von Uferwänden aus Stahlspundbohlen“,
- 2006 auf dem 31th PIANC Congress in Estoril, Portugal,
- 2007 auf dem HTG-Kongress in Dresden,
- 2009 auf dem Workshop „Spundwände – Profile, Tragverhalten, Bemessung, Einbringung und Wiedergewinnung“ der TU Hamburg-Harburg und
- 2010 auf der Fachtagung „Bauwerksdiagnose 2010“ in Berlin

vorgelegt.

2008 wurde das WaDiMe-Programmpaket vollständig überarbeitet und benutzerfreundlicher gestaltet. Seitdem wurden zahlreiche Fehlerkorrekturen und Anpassungen durchgeführt. 2013 erfolgte die Umstellung auf Windows 7 und Office 2010 sowie 2013 - 2014 eine Plausibilisierung der Datenbankinhalte.

2006 wurde erstmalig eine Installation des WaDiMe-Programmpaketes an eine externe Stelle – das WSA Minden – zur selbstständigen Durchführung und Auswertung von Spundwanddickenmessungen weitergegeben; in diesem Zusammenhang wurde bereits 2004 eine zweitägige Schulung durchgeführt.

Nachdem die Laborvergleichsmessungen zwischen Wirbelstrommessung, Verfahren Incotest, und Ultraschall 2006 eine gute Übereinstimmung bzgl. der Bestimmung der Mittleren Abrostungen erwarten ließen, die vor-Ort-Vergleichsmessungen 2007 aber zu widersprüchlichen Ergebnissen führten, ergab eine erneute Messkampagne 2008, dass aufgrund der Messungenauigkeit des Incotest-Verfahrens unter realen Einsatzbedingungen keine aussagekräftigen Ergebnisse erzielt werden können. Maximalen Abrostungen konnte verfahrensbedingt von vornherein nicht erwartet werden.

Labormessungen zeigten 2009, dass das Ultrabreitbandsonar-Verfahren der Fa. Evologics erwartungsgemäß (da es sich ebenfalls um ein auf Ultraschall basierendes Verfahren handelt), zutreffende Restwanddickenwerte liefert. Weitere 2010 geplante vor-Ort-Vergleichsmessungen scheiterten an den unzureichenden Kapazitäten der Fa. Evologics.

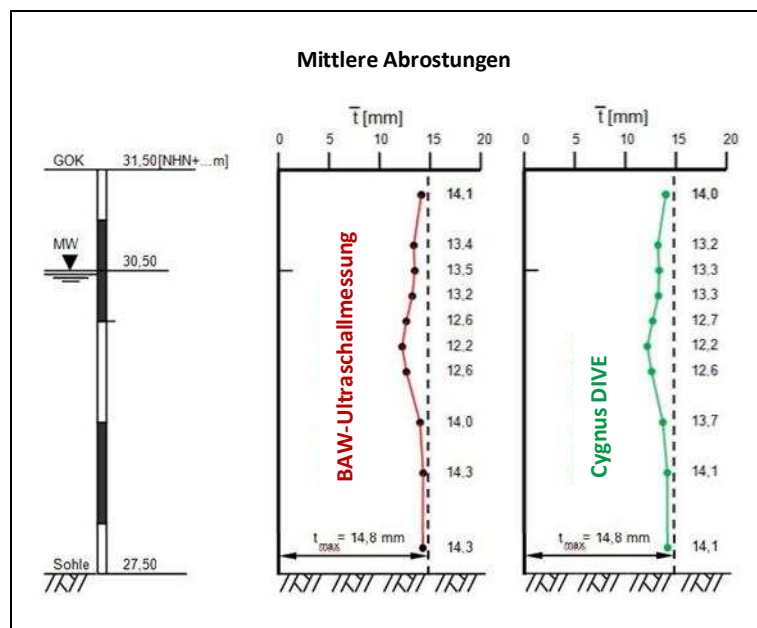


Bild 1: Ergebnis der Spundwand-Vergleichsmessung 2014 (Tangermünde, Liegestelle Elbe)

2014 wurden Labor- und vor-Ort-Vergleichsmessungen mit dem Mehrfachecho-Ultraschall-Messgerät Cygnus Dive durchgeführt. Bei diesem Verfahren wird die Laufzeit einer Gruppe von drei aufeinanderfolgenden Spundwand-Echos ausgewertet: Das erste Echo, welches durch eine evt. vorhandene Rost- oder Farbschicht beeinflusst wird, wird ignoriert; die Wanddicke wird automatisch aus dem zweiten Echo ermittelt (beim bisher von der BAW eingesetzten Ultraschall-Verfahren obliegt die Zuordnung und Interpretation dem Anwender). Alle Tests verliefen ausnahmslos positiv:

- Das Mehrfachecho-Verfahren liefert zutreffende, reproduzierbare Messwerte sowohl hinsichtlich der Mittleren (s. Bild 1) als auch hinsichtlich der Maximalen Abrostungen.
- Gleichzeitig kann der Aufwand zur Reinigung der Messstellen deutlich reduziert werden, was etwa zu einer Halbierung des Messaufwandes führt.
- Die Bedienung ist einfacher, und die Messwerte lassen sich besser verifizieren.
- Die Messkonfiguration beinhaltet zudem ein Armband mit großer Digitalanzeige für den Taucher, so dass dieser den eigentlichen Messvorgang erstmals unmittelbar nachvollziehen kann.

Nachteilig ist die – im Vergleich zum bisher in der BAW eingesetzten Messgerät – kleinere, nicht-magnetische Aufstandsfläche des Messkopfes: Der Messkopf muss deshalb permanent festgehalten werden und kann sich zudem einfacher verkanten. Bei Bedarf kann jedoch eine magnetische Halterung des Messkopfes nachgerüstet werden.

Insgesamt überwiegen jedoch die Vorteile deutlich, so dass das Cygnus Drive 2014 für die BAW angeschafft wurde und seitdem eingesetzt wird.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Damit Wanddickenmessungen von den Wasser- und Schifffahrtsämtern vermehrt an Ingenieurbüros vergeben werden können, wird derzeit eine detaillierte Beschreibung zur fachgerechten Durchführung und Auswertung von Ultraschall-Messungen erarbeitet, die dann als Ausschreibungsgrundlage für Wanddickenmessungen dienen kann.

Laufzeit des Vorhabens: 2001 bis 2015.

#### **5 Literatur**

European Communities (2007): Design method for steel structures in marine environment including the corrosion behaviour. Final report. ECSC Steel RTD program. Contract number 7210-PR/317. Final report.

#### **6 Veröffentlichungen**

-/-

**Deckwerksanalyse mit der Distinkt Element Method (DEM)****Netzplan-Nr.:** A39550170270**Projektleiter/in:** Dipl.-Ing. L. Mittelbach, Dr.-Ing. M. Pohl, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Geotechnik Nord (K1),**E-Mail:** martin.pohl@baw.de, livia.mittelbach@baw.de**1 Problemstellung und Ziel**

Kenntnisse über Schädigungsmechanismen und Widerstände von Deckwerken gegenüber hydraulischen Belastungen sind für eine wirtschaftliche Bemessung von Deckwerken in der WSV unverzichtbar. Für die komplexen und vielfältigen Randbedingungen in den Ästuarien sind die derzeitigen Bemessungsgrundlagen unzulänglich. Das Ziel ist, mit Hilfe numerischer Verfahren die Widerstände von Deckwerken gegenüber hydraulischen Belastungen für die jeweiligen lokalen Randbedingungen im Tidegebiet zu erfassen und eine integrierte Bemessung zu ermöglichen. Schädigungsmechanismen können auf Grundlage der Simulationen hergeleitet werden. Naturmessungen dienen der Validierung des numerischen Modells.

**1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Bemessung von Deckwerken erfolgt derzeit auf Grundlage von Erfahrungswerten und physikalischen Modellansätzen (z. B. Hansen (1985), GBB (2010), EAK (1993 u. 2002)). Durch kleinmaßstäbliche Modellversuche und Beobachtungen in der Natur wird auf die Widerstandsfähigkeit des Deckwerks gegenüber den hydraulischen Einwirkungen geschlossen, wobei die Interaktion Seeschiff – Deckwerk bisher nur unzureichend untersucht wurde.

Bisher erfolgte eine Zusammenführung von Einwirkungen und Widerständen auf Grundlage der Finite Elemente Methode (FEM), wobei jedoch nur eine Massenbetrachtung angestellt werden kann. Bei einer numerischen Simulation des Deckwerks mit der DEM können sich die einzelnen Partikel hingegen „frei“ bewegen und unterliegen keinen finiten Begrenzungen. Eine Simulation mit der DEM hat bisher nicht stattgefunden, da die DEM in der Geotechnik derzeit vorwiegend für Grundlagenforschungen verwendet wird und die Methode mit vergleichsweise langen Rechenzeiten einhergeht. In der letzten Zeit finden erste Hochschulaktivitäten auf diesem Gebiet statt, jedoch häufig nur mit zweidimensionalen Betrachtungen, anderen Simulationsalgorithmen und dem derzeitigen Augenmerk auf der Schnittstellenproblematik.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

In der WSV werden im Rahmen der Unterhaltung und des Neubaus große Mengen an Deckwerksteinen als Ufersicherung eingebaut. Eine Bemessung von Deckwerken und Bühnen im Tidebereich ist häufig mit Unsicherheiten verbunden. Mitunter treten Deckwerksschäden auf, deren Ursachen nicht einhellig geklärt sind.

Durch eine numerische Analyse der lokalen Randbedingungen, d. h. hydraulische Belastung (Tide, Wind- und Schiffswellen, Grundwasserpotentiale), Bodenaufbau, Filtermaterial, Deckwerkssteine (Form, Größe, Masse) und Deckwerksdicke, kann die Ermittlung der Stabilität des Deckwerks mit / ohne Verklammerung verbessert werden und eine individuelle Bemessung erfolgen. Aufgetretene Schäden können durch die numerischen Simulationen auf verursachende Mechanismen zurückgeführt werden.

**1.3 Untersuchungsziel**

Mit Hilfe numerischer Verfahren soll die Widerstandsfähigkeit von Deckwerken gegenüber hydraulischen Belastungen für die jeweiligen lokalen Randbedingungen im Tidegebiet erfasst werden und eine sichere sowie wirtschaftliche Deckwerksbemessung ermöglichen. Schädigungsmechanismen sollen auf Grundlage der Simulationen hergeleitet werden. Die numerischen Ergebnisse werden an Beobachtungen sowie Messungen in der Natur und im Modell sowie an Erfahrungswerten validiert.

## 2 Untersuchungsmethoden

Die Deckwerkssteine können in ihrer Form, Größe und Masse mit der DEM in drei Dimensionen (hier PFC3D – Particle Flow Code ) weitgehend realistisch abgebildet werden (Bild 1). Durch die dreidimensionale Betrachtung werden alle Freiheitsgrade der Deckwerkssteine wirklichkeitsnah simuliert. Die hydraulischen Einwirkungen (Wellen und Strömung) werden mit einem CFD-Add-on (CCFD - Coupled Computational Fluid Dynamics) erfasst. Zur ganzheitlichen Modellierung der Interaktion Wasser – Deckwerk werden die Programme PFC3D und CCFD miteinander gekoppelt.

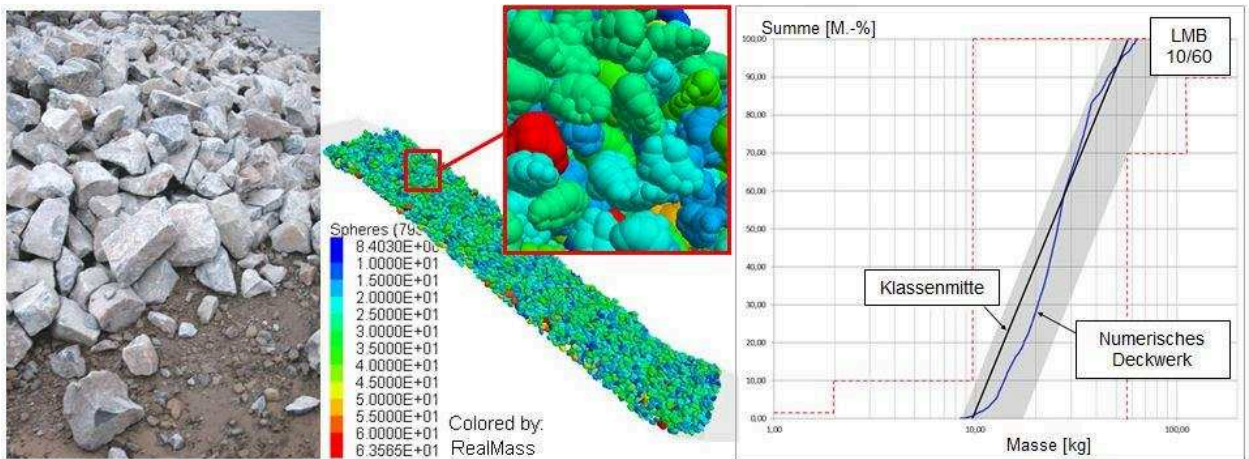


Bild 1: reale Deckwerkssteine (Beispiel), numerisches Deckwerk  $LMB_{10/60}$  und dazugehörige Summenkurve

Mittels physikalischer Modellversuche in der großen hydraulischen Rinne der BAW-DH werden die numerischen Parameter für die Deckwerkssteine kalibriert. Dazu wurde ein Abschnitt mit losen Deckwerkssteinen durch eine böschungparallele Strömung beansprucht. Steinverlagerungen wurden messtechnisch und visuell erfasst, um die Messergebnisse im numerischen Modell simulieren zu können.

Reale Deckwerkssteine werden mit Messeinheiten zur Aufnahme von translatorischen und rotatorischen Bewegungen (Beschleunigungs- und Drehratensensoren) und mit Drucksensoren instrumentiert und in bestehenden Deckwerken sowie bei den Modellversuchen eingebaut. Über die Messung der Beschleunigung und Lageänderung infolge der hydraulischen Belastungen soll auf die wirkenden Kräfte rückgerechnet werden. Hierzu werden im Feld ergänzend Messungen der hydraulischen Einflussgrößen durchgeführt und eine videometrische Aufnahme der Wellenbilder vorgenommen. Im numerischen Modell sollen das hydraulische Ereignis und die resultierenden Beschleunigungen/Kräfte an den Deckwerkssteinen simuliert werden.

Des Weiteren werden die numerischen Ergebnisse an Beobachtungen in der Natur und Erfahrungswerten plausibilisiert und validiert. Aus zeitlichen Gründen wurde bereits im Sept. 2008 das Forschungsvorhaben an die Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Lehrstuhl für Gebirgs- und Felsmechanik/Felsbau vergeben. Seit Sept. 2011 arbeitet neu eingestelltes Forschungspersonal in Hamburg an dem FuE.

## 3 Ergebnisse

2014 lag das Hauptaugenmerk auf der Anpassung der numerischen DEM-Simulation an die neue Programmversion, dem Abschluss des Versuchsprogrammes in der großen hydraulischen Rinne sowie der Fortführung der Feldmessungen.

Der Steingenerierungsalgorithmus wurde für das neue PFC3D 5.0 grundlegend überarbeitet. Die Generierung der im numerischen Modell abgebildeten Deckwerkssteine anhand ausgewählter repräsentativer Oberflächengeometrien erfolgt nun programmintern. Darauf aufbauend ist die realistische

Abbildung eines gesamten Deckwerkes in PFC3D entsprechend der Größen- bzw. Massenverteilung jeder Wasserbausteinklasse möglich (Bild 1). Die Generierung der im Forschungsvorhaben zu simulierenden Deckwerke der Wasserbausteinklassen CP<sub>90/250</sub>, LMB<sub>5/40</sub> und LMB<sub>10/60</sub> ist abgeschlossen. Die Parametervariationen im numerischen Modell zur Untersuchung des Einflusses der Steinauflösung (Detailgenauigkeit bei der Generierung der numerischen Deckwerkssteine) wurden fortgeführt.

Im CCFD können Wellen- und Strömungsbelastungen grundlegend abgebildet werden. Die Simulation von Wellenbelastungen erfolgt über die Aufgabe von zeitlich veränderlichen Randbedingungen entsprechend der linearen Wellentheorie am Rand des Modells (zeitabhängige Variation der Auslenkung der freien Wasseroberflächen sowie der horizontalen vertikalen Orbitalgeschwindigkeit). Somit wird eine auf das Deckwerk auflaufende Welle erzeugt. Es wurde damit begonnen, die Messdaten der Feldversuche als Eingangswerte zur Simulation von Schiffswellen im Modell zu verwenden. Die realitätsnahe Simulation schiffserzeugter Wellen wird weiter präzisiert und auf den 3D-Fall erweitert.

In der hydraulischen Rinne wurden die Versuchsreihen zur Überströmung eines Deckwerksabschnittes und den daraus resultierenden Steinverlagerungen abgeschlossen. Es wurden Deckwerksabschnitte mit einer Neigung von 1:1,5 und 1:3 bei einer stufenweisen Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit bis zu einem Maximum von 2,0 m/s untersucht. Die in den Modellversuchen gemessene Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit sowie der Abfall des Wasserspiegels und die Verlagerung der Deckwerkssteine konnten im gekoppelten numerischen Modell abgebildet werden (Bild 2). Weiterhin wurden im Rahmen der Modellversuche instrumentierte Deckwerkssteine in der hydraulischen Rinne eingesetzt. Die Messergebnisse zeigten qualitativ den Beginn der Bewegung der Wasserbausteine infolge Überströmung.

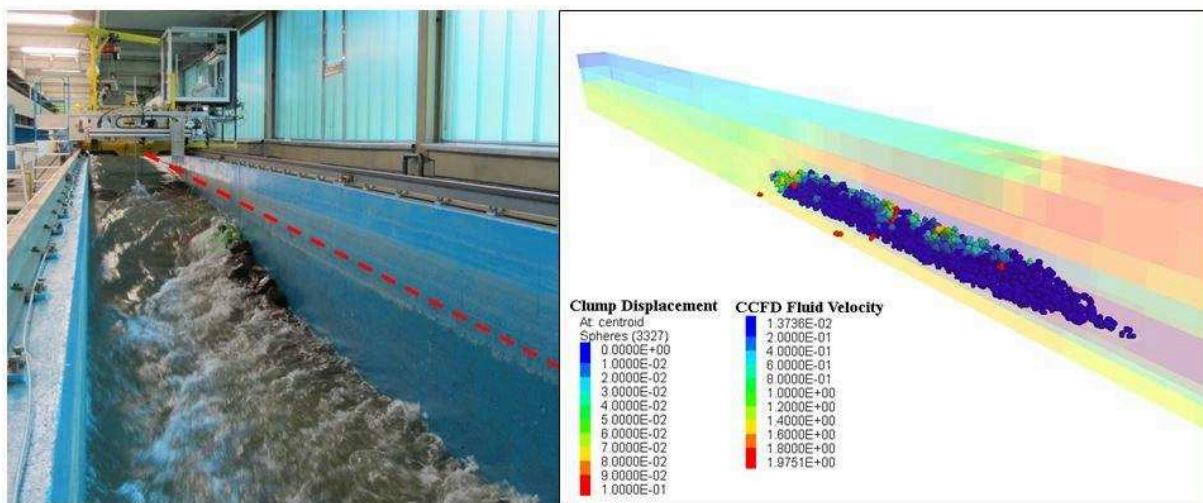


Bild 2: Modellversuch in hydraulischer Rinne und numerische Simulation

Für die Schaffung einer Datengrundlage zur Validierung der numerischen Modellierung anhand von Feldmessungen wurden die Wellen- und Strömungsmessungen unter Einsatz von zwei autarken Sonden in exponierter Lage auf der Elbinsel Lühesand im Rahmen einer Projektbearbeitung fortgeführt. Parallel dazu wurden Messungen mit jeweils fünf instrumentierten Deckwerkssteinen in-situ im bestehenden Deckwerk vorgenommen.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015: Auswertung und abschließende Simulation der physikalischen Modellversuche, Kalibrierung der numerischen Deckwerkssteine, Fortführung der Feldmessungen mit instrumentierten Deckwerksteinen einschließlich Datenanalyse und numerischer Simulation der Ereignisse und Reaktionen, Weiterentwicklung und Kalibrierung der Simulationsmodelle, Weiterentwicklung des Messsystems instrumentierter Deckwerksstein



2016: Ermittlung der optimalen Deckwerksteinformen, -größen, -massen, -verteilungen, Deckschichtdicken, Fußstützungsarten und die Arten des Deckwerkbaus für charakteristische Randbedingungen in den Ästuaren durch Parametervariationen und Programmerweiterungen.

Laufzeit des Vorhabens: 2008 bis 2016.

## 5 Literatur

-/-

## 6 Veröffentlichungen

- Mittelbach, L.; Pohl, M. (2012): Böschungsdeckwerke unter Wellenbelastung. „Johann-Ohde-Kolloquium“, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, BAW-Mitteilungen Nr. 95, Seite 41 - 47
- Mittelbach, L. (2013): Numerical Simulation of Rip-Rap with the Distinct Element Method, AIP Conf. Proc. 1542, Seite 1178 – 1181, doi: 10.1063/1.4812147
- Mittelbach, L., Pohl, M., Schulze, P., Konietzky, H. (2014): Numerical Simulation of Rip-Rap Revetments in Tidal Areas. Die Küste, Heft 81, Westholsteinische Verlagsanstalt Boysens & Co., Heide i. Holstein, Seite 119 – 132

## **Bestimmung der Widerstandsfähigkeit von Deichen**

**Netzplan-Nr.:** A39550170318

**Projektleiter:** Dr.-Ing. T. Nuber, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Geotechnik Nord (K1)

**E-Mail:** thomas.nuber@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

Die Deichabdeckung weicht in Abhängigkeit des Deichbaumaterials, der Einbaubedingungen, der Bodenstrukturbildung (Risse, Bioturbation, Alter), Einbauten, des Zustands der Grasnarbe, der Zeit und Höhe des hydraulischen Ereignisses, vorhergehender meteorologischer Ereignisse sowie Aufsättigung des Deichkerns unterschiedlich stark auf, was zu einem Deichversagen führen kann. Des Weiteren wirken im Sturmflutfall Wellenangriff und Wellenüberlauf auf die Grasnarbe und die Deichabdeckung, wodurch diese erodieren kann. Der Einfluss aller Faktoren und die jeweiligen Abhängigkeiten sollen im Feld bzw. im Labor ermittelt und in einem numerischen Modell zusammengeführt werden. Durch die Verwendung eines numerischen Modells, können sich Versagensmechanismen frei entwickeln und sich überlagernde physikalische Phänomene zusammen berücksichtigt werden.

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Ausbildung von Deichen geschieht derzeit auf der Grundlage von Erfahrungswissen sowie physikalischen Modellansätzen und analytischen Gleichungen. Analytische Nachweisführungen bestehen für verschiedene einzelne Versagensmechanismen. Derzeitig werden einzelne Aspekte für die Widerstandsfähigkeit von Deichen unabhängig voneinander untersucht, wie z. B. die Rissentwicklung, der Einfluss der Grasnarbe auf den Erosionswiderstand sowie die Erosion des Deichbaumaterials. Aus den Untersuchungen werden Empfehlungen und analytische Ansätze abgeleitet. Einzelne ungekoppelte numerische Verfahren zur Simulation von morphodynamischen und hydraulischen Prozessen werden verwendet.

Eine ganzheitliche Betrachtung aller Aspekte findet derzeit nicht statt. Durch eine numerische mechanisch-hydraulisch gekoppelte Modellierung eines Deichquerschnittes mit seinen charakteristischen Eigenschaften (Deichbaumaterial, Bodenstruktur, Jahreszeit, Grasnarbe) unter der Einwirkung eines hydraulischen Ereignisses (Sturmflut, Starkregen, Einwirkungsdauer) ist eine Bemessung möglich, die alle Versagensmechanismen beinhaltet. Deichschäden und potentielle Gefährdungsbereiche können über eine Parametervariation ermittelt und Deichverstärkungsmaßnahmen bewertet werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Für den Festlandschutz sind funktionstüchtige und widerstandsfähige Deiche gegenüber den Einwirkungen aus Sturmfluten - vor dem Hintergrund eines säkularen Meeresspiegelanstiegs - unerlässlich. Im Rahmen der Unterhaltung von Bundeswasserstraßen fallen große Mengen an Baggergut an. In Kenntnis des säkularen Meeresspiegelanstiegs sind Deichverstärkungsmaßnahmen erforderlich. Die Entnahme von Klei und Mergel ist häufig mit rechtlichen und ökologischen Schwierigkeiten versehen, so dass sich die Verwendung von Baggergut als Deichbaumaterial anbietet. Zur Bewertung zu verstärkender Deichquerschnitte mit Baggergut (Kubatur, Zusammensetzung) auf bestehenden Klei- oder Mergeldeichen sollen physikalische und numerische Untersuchungen vorgenommen werden.

Beim Ausbau der Bundeswasserstraßen im Tidebereich werden Deichschäden sowie Schäden im Hinterland häufig auf die Ausbaumaßnahmen zurückgeführt. Durch eine numerische Simulation sollen auftretende Schäden und verursachende Mechanismen untersucht werden. Die Ursachen können benannt und somit verhindert werden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Mit Feld- und Laboruntersuchungen sowie numerischen Simulationen sollen die Widerstände von Deichen (sowie Deichverstärkungen) den hydraulischen Belastungen gegenübergestellt werden und

somit letztendlich die Ermittlung der Widerstandsfähigkeit des Deiches inkl. der Ermittlung der Schwachstellen ermöglichen.

## 2 Untersuchungsmethoden

Anhand von Untersuchungen an bestehenden Deichen sowie an einem neu zu errichtenden Deich unter definierten Bedingungen soll der Einfluss von Alterungsvorgängen (Strukturbildung) und Wasserbelastung auf die Scherfestigkeit sowie Durchlässigkeit der Deichabdeckung ermittelt werden. An einem neu zu errichtenden Deich unter definierten Bedingungen sollen Untersuchungen durchgeführt werden, um prinzipielle Aussagen zu erhalten und die sonst üblichen - durch Inhomogenitäten - auftretenden Streubreiten bei bestehenden Deichen zu reduzieren.

### Felduntersuchungen:

Zur Simulation von erhöhten (stationären) Wasserständen im Sturmflutfall wird auf der seeseitigen Böschung oder Deichkrone über geeignete Behältnisse eine Wasserauflast von bis zu 3 m erzeugt. Zu verschiedenen Zeitpunkten (nach 0 – 4 – 8 – 24 Stunden) werden Sonderproben über die Tiefe der Deichabdeckung entnommen. Diese werden anschließend im bodenmechanischen Labor untersucht. Während der Wasserbeaufschlagung werden die Infiltrationsraten protokolliert, wodurch die in situ Durchlässigkeiten unter Berücksichtigung der Strukturbildung ermittelt werden.

Zur Erfassung der zeitabhängigen Strukturbildung ist derzeit eine Versuchsdauer von 10 Jahren vorgesehen. In Beprobungsintervallen von 0 – 1 – 3 – 5 – 10 Jahren sollen zu den Jahreszeiten Herbst, Frühjahr und Sommer die o. g. Untersuchungen durchgeführt werden.

### Laboruntersuchungen:

Die entnommenen Sonderproben werden in Triaxialversuchen - mit dem durch die Feldversuche eingestellten Wassergehalt - dräniert, ohne back-pressure mit geringen Konsolidationsspannungen (10 - 30 - 60 kPa) abgesichert. Des Weiteren sind Kompressionsversuche mit Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit durchzuführen. Somit werden alle wassergehaltsabhängigen Parameter für eine spezifische Deichabdeckung für die numerische Modellierung ermittelt.

### Numerische Simulation:

Der Deichquerschnitt wird mit einem drei-dimensionalen Finite Differenzen Programm (FLAC3D) simuliert. Somit sind Berechnungen bei großen Dehnungen möglich, um Versagensmechanismen sowie deren Verlauf ermitteln zu können. Zur Erfassung der hydraulischen und bodenmechanischen Vorgänge wird die Simulation mechanisch-hydraulisch gekoppelt durchgeführt. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven aus den Triaxial- und Kompressionsversuchen in Abhängigkeit der Dauer der hydraulischen Beanspruchung und weiterer Randbedingungen (Bodenart, Alter, ...) werden im Programm hinterlegt, um die Entwicklung der Scherfestigkeiten und Durchlässigkeiten realistisch zu erfassen. Somit wird die Aufweichung auch infolge Wassereinstau im Deichkern oder stärkerer Infiltrationen durch Sandnester oder Wühlgänge berücksichtigt. Eine Durchsickerung des Deiches gemäß dem Ereignis und eine Änderung der Gebrauchstauglichkeit / Standsicherheit sind das Ergebnis der numerischen Simulation. Inhomogenitäten des Deichbaumaterials und des unterlagernden Bodens können durch eine Gauß-Verteilung der Bodenkennwerte berücksichtigt werden. Die Grasnarbe wird durch entsprechende Parameterzuweisung der Netzbereiche simuliert. Erosionsvorgänge der Grasnarbe und der Deichabdeckung sollen durch Auflösen des Kontinuums im entsprechenden Bereich und dem Ersetzen durch ein Diskontinuum (PFC3D) simuliert werden.

## 3 Ergebnisse

Im Jahr 2012 wurde mit dem Programm FLAC3D ein parametrisiertes Deichmodell für die Eingabe variabler Deichgeometrien erstellt. Eine lagegenaue sowie zeitabhängige Zuweisung von Bodenparametern entsprechend der Laborversuchsergebnisse durch hinterlegte Tabellen erlauben die numerische Ermittlung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit.

Im November 2011 wurden Untersuchungen und Probenahmen an einem Altdeich und einem Neudeich aus Mergel in Dahme (Schleswig-Holstein) durchgeführt. Im Oktober 2013 wurde am Deichabschnitt des Neudeichs eine erneute Untersuchung und Probenahme durchgeführt. Mittlerweile hat sich

auf dem Deich eine Grasnarbe mit einer Dicke von ca. 5 cm und mit einer Durchwurzelungstiefe von ca. 10 – 15 cm ausgebildet. An den Probenahmestellen wurden jeweils zwei Infiltrationsversuche mit einer Dauer von 4 h und einer Dauer von 24 h durchgeführt. Nach Abschluss der Infiltrationsversuche wurden in der Mitte dieser Flächen sowie an einer Stelle, an der kein Infiltrationsversuch durchgeführt wurde, ungestörte Proben in verschiedenen Tiefen genommen. Der Wassergehalt wurde diesmal direkt vor Ort ermittelt.

Bei den Infiltrationsversuchen konnte für alle drei Probenahmestellen und unabhängig von der Dauer der Infiltration kein Wasser in den Deich infiltriert werden. Erhöhte Wassergehalte infolge der Infiltrationsversuche konnten nicht festgestellt werden. Durch vorangegangene Niederschlagsereignisse ist jedoch von einer gewissen Sättigung auszugehen. Die Bandbreite sowie der jeweilige Mittelwert der Wassergehalte über die Entnahmetiefe sind in Bild 1 dargestellt. Die höchsten Wassergehalte werden erwartungsgemäß im Bereich der Grasnarbe gemessen. Für den Mergelbereich liegen die mittleren Wassergehalte der einzelnen Probenahmetiefen zwischen 11,1 (Entnahmetiefe 1,2 m) und 15,2 Gew. -% (Entnahmetiefe 1,5 m).

Insgesamt zeigte sich der Deich hinsichtlich der gemessenen Wassergehalte als sehr heterogen.

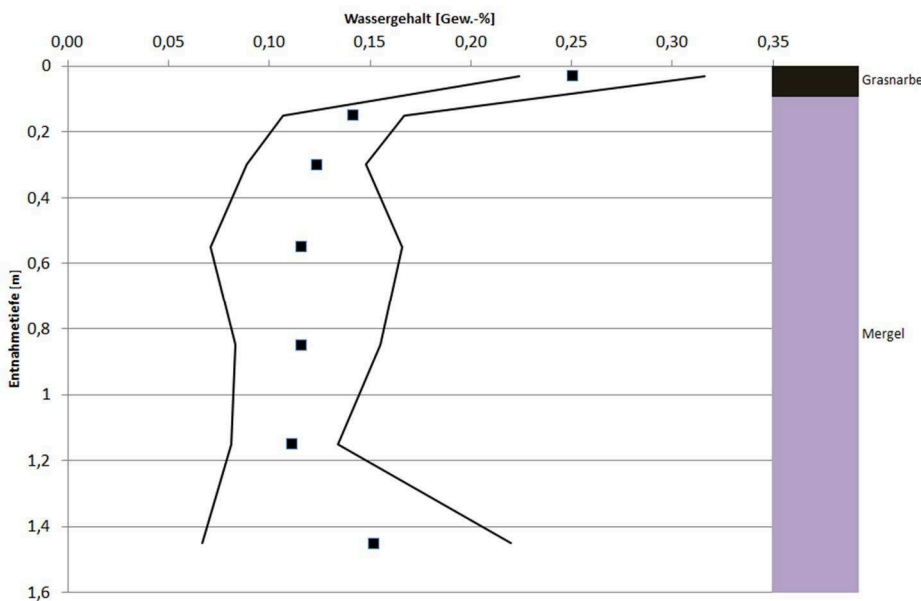


Bild 1: Wassergehalte in Abhängigkeit der Entnahmetiefen

Zusätzlich wurden unmittelbar nach der Sturmflut „Xaver“, die als dritthöchste Sturmflut an nahezu allen Pegeln der deutschen Nordseeküste gilt, an einem Altdeich an der Elbe sowie an einem schwarzen Deich (Neudeich ohne Grasnarbe) an der Nordsee – beide mit einer Deichabdeckung aus Klei - Untersuchungen mit einer Flügelschersonde durchgeführt. Dabei zeigte sich sowohl beim Altdeich als auch beim Neudeich eine Zunahme der Anfangsscherfestigkeit über die Tiefe der Deichabdeckung. Am Altdeich wurden generell höhere Festigkeiten im Bereich der wasserseitigen Böschung unterhalb der Treibselgrenze beobachtet, wobei die Deichabdeckung mit guter Grasnarbe oberflächennah etwa doppelt so hohe Scherfestigkeiten aufwies wie eine Deichabdeckung mit schlechter Grasnarbe.

Für den Bau der Versuchsdeiche am Abz. Wedel des WSA Hamburgs wurde 2013 eine Machbarkeitsstudie an das Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg vergeben. Ziel dieser Studie war es, die organisatorische und zeitliche Umsetzung sowie die wirtschaftliche und technische Machbarkeit und ihre wissenschaftliche Verwertbarkeit zu untersuchen. Als Ergebnis dieser Machbarkeitsstudie lässt sich zusammenfassen, dass der vom WSA Hamburg zur Verfügung gestellte Standort auf dem Gelände des Abz. Wedel für den Bau von Versuchsdeichen geeignet ist. Unter Berücksichtigung der anhand gängiger Regelwerke festgelegten Qualitätsanforderungen wurde als mögliche Beschaffungsquelle das Klei-Abbaugelände Hamburg-Moorfleet genannt. Für die Beschaf-

fung des Baggergut wurden Entnahmebereiche in der Tideelbe aufgezeigt und der rechtliche Hintergrund des gezielten Baggerns zur Materialbeschaffung kritisch erörtert.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2015: Weiterentwicklung des numerischen Modells - Hinterlegung der Bodenzustandsparameter, Durchführung von Modellrechnungen und Parameterstudien mit dem numerischen Modell. Untersuchungen an bestehenden Deichen (Mergel, Klei, Baggergut). Weitere Planung des Versuchsdeichs in Wedel. Verifizierung von derzeitigen analytischen Modellvorstellungen

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2015.

#### **5 Literatur**

-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

Nuber, T., Pohl, M. (2014): Geotechnical investigations on dike materials as a basis for a holistic numerical model. Proceedings of the South Baltic Conference in Dredged Materials in Dike Construction, 10-12 April 2014, Rostock

## Störung des Baugrundes durch Kampfmittelsondierungen

Netzplan-Nr.: A39550170362

Projektleiterin: Dipl.-Geol. A. Heeling, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Geotechnik Nord (K1)

E-Mail: anne.heeling@baw.de

### 1 Problemdarstellung und Ziel

#### 1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Im Vorwege einer Baumaßnahme ist die Kampfmittelfreiheit im Baufeld sicherzustellen. Die zur Kampfmittelsuche eingesetzten, überwiegend magnetischen und elektromagnetischen Sondierverfahren arbeiten selbst zwar zerstörungsfrei, erfordern aber häufig Aufgrabungen oder Bohrungen. Bei Tiefensondierungen wird die Messsonde dann vom Bohrloch aus eingesetzt. Das Bohrverfahren, das Erkundungsraster und die Erkundungstiefe werden vom Kampfmittelräumdienst (KRD) des jeweiligen Bundeslandes auf Grundlage länderspezifischer Verordnungen und Verwaltungsvorschriften und auch einzelfallbezogen nach dem Ermessen des Sachverständigen nach Sprengstoffgesetz (SprengG) festgelegt. Für den Bund gelten zudem eigene Vorgaben.

Hier kommt es zu einem Interessenkonflikt zwischen dem KRD einerseits und dem Bauherrn bzw. dessen Baugrundgutachter andererseits. Während der KRD für gesicherte Aussagen zum Kampfmittelverdacht ein möglichst enges Erkundungsraster benötigt (s. Bild 1), bedeutet die Kampfmittelsondierung mittels Bohrungen für den Bauherrn in erster Linie eine Störung des Baugrundes, die es aus geotechnischer Sicht zu begrenzen gilt.



Bild 1: Kampfmittelsondierung für eine Baumaßnahme (Foto: KED, Hamburg)

Zum Ausmaß der durch Kampfmittelsondierungen verursachten Veränderung der Festigkeitseigenschaften des Baugrundes liegen derzeit keine gesicherten, belastbaren Informationen vor. Konkrete Informationen hierzu sind aber eine wichtige Grundlage für erdstatische Bemessungen, d. h. für die Dimensionierung von Bauteilen, und sind damit auch eine Argumentationsgrundlage in Besprechungen zwischen Bauherrn und KRD. Zudem können nur in Kenntnis der veränderten Festigkeiten Altaufschlüsse, die vor der Kampfmittelerkundung durchgeführt wurden, neu interpretiert werden.

## 1.2 Bedeutung für die WSV

Es obliegt dem Bauherrn, sich im Vorwege einer Baumaßnahme die Kampfmittelfreiheit des Baufeldes z. B. durch den KRД des jeweiligen Bundeslandes bescheinigen zu lassen. Für die WSV ergibt sich daraus folgende Problemstellung:

- Die Zuständigkeitsbereiche der einzelnen Wasser- und Schifffahrtsämter decken sich i.d.R. nicht mit den Grenzen der Bundesländer. Als Folge können für ein Bauprojekt größerer räumlicher Ausdehnung (z. B. die Vertiefung eines Kanals oder eines Flusses) mehrere KRДs zuständig sein, die dann für einzelne Baubereiche unterschiedliche Kampfmittelerkundungsprogramme auf der Grundlage unterschiedlicher Technischer Anleitungen festlegen. Zudem können bei Bundesliegenschaften neben länderspezifischen auch bundesspezifische Vorschriften gelten.
- Für Pfahlgründungen und Spundwände, die im Zuständigkeitsbereich der WSV häufig verwendete Bauteile sind, werden in den Technischen Anleitungen meist spezifische Anforderungen an die Kampfmittelsondierungen gestellt.
- In Kenntnis des zu erwartenden Baugrundes wird seitens des zuständigen KRД der sogenannte „Verdachtshorizont“ und damit die erforderliche Erkundungstiefe für die Kampfmittelsondierung festgelegt: in organischen oder bindigen Böden geringer Festigkeit ist auch in größeren Tiefen - lt. Hamburger TA Kampfmittelräumung bis 3 m unter deren Schichtunterkante - mit Bomben-Blindgängern zu rechnen. Solche Böden (z. B. Auelehm, Mudde, Klei) treten häufig gewässernah und damit im Zuständigkeitsbereich der WSV auf.
- Laut „Arbeitshilfen Kampfmittelräumung“ liegt „*bei Kriegersende von Soldaten oder Einheiten aufgegebene andere Munition (... Munition für Handfeuer- und Maschinenwaffen, Granaten, Minen) ... nicht selten an verkehrsgünstiger Stelle in Flüssen oder Seen*“ und damit im Zuständigkeitsbereich der WSV.

Aus den Ergebnissen des FuE-Vorhabens können für die WSV Vorschläge zur Planung, Ausschreibung und Durchführung von Kampfmittelerkundungen erarbeitet werden, um den anstehenden Baugrund in seiner Tragfähigkeit möglichst wenig zu beeinträchtigen.

## 1.3 Untersuchungsziel

Ziel dieses FuE-Vorhabens ist es, die durch die Kampfmittelerkundung entstandene Störung des Baugrundes, d. h. die Veränderung der Festigkeiten, qualitativ zu erfassen.

## 2 Untersuchungsmethoden

Das FuE-Vorhaben wurde 2013 in enger Zusammenarbeit von der BAW und dem Hamburger Ingenieurbüro Knabe Enders Dührkop Ingenieure GmbH (KED), das über mehrjährige Erfahrung mit der Betreuung von Kampfmittelsondierungen verfügt, gemeinsam durchgeführt. Wegen der Geschäftsaufgabe von KED wurde 2014 mit dem Hamburger Ing.-Büro Fichtner Water & Wind GmbH ein neuer Kooperationspartner gefunden.

2013 wurden die Kampfmittelverordnungen der Länder und des Bundes hinsichtlich geotechnisch relevanter Anforderungen (Bohrverfahren, Rasterabstand, Erkundungstiefe, etc.) gesichtet und tabellarisch aufbereitet. Es geben jedoch nicht alle Bundesländer schriftliche Kampfmittelverordnungen heraus und in Absprache mit dem KRД sind auch abweichende Erkundungsverfahren zulässig.

2014 wurde deshalb mittels einer Fragebogenaktion bei KRДs, Bohrfirmen und Flächeneignern (WSV, Hafenbetreiber) hinterfragt, in welcher Form Kampfmitteluntersuchungen in der Praxis tatsächlich am häufigsten durchgeführt werden. Gleichzeitig wurden im Zuständigkeitsbereich der WSV geeignete Testfeldern sowie reale, zur wissenschaftlichen Begleitung geeignete Kampfmittelprojekte gesucht und gefunden.

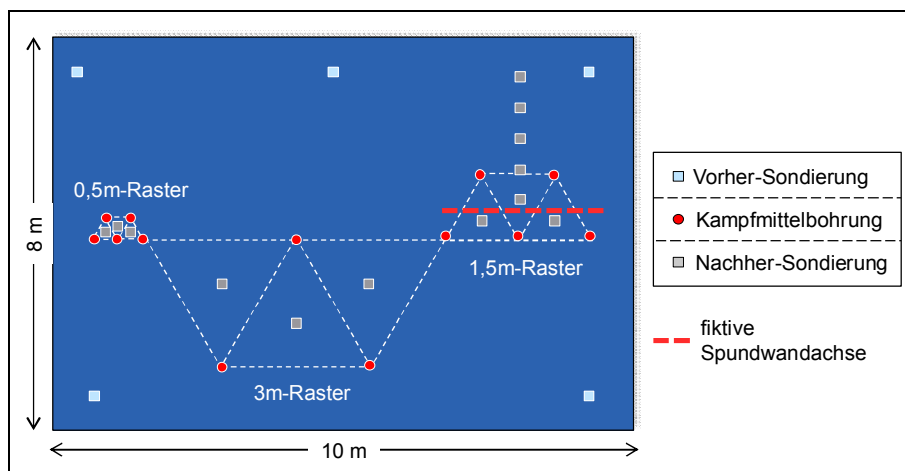
Im Rahmen von Feldversuchen wird die Veränderung des Baugrundes als Folge einer Kampfmittelerkundung untersucht. Der Versuchsaufbau berücksichtigt die Einflussfaktoren *Baugrundtyp* (jeweils in unterschiedlichen Festigkeiten: nichtbindig über Grundwasser / nichtbindig unter Grundwasser / bin-

dig), *Bohrraster* (0,5 m / 1,5 m / 3,0 m), *Bohrverfahren* (Hohlbohrschnecke / Bohrung mit glatter Verrohrung) und *Bohrlochverfüllung* (Bohrgut / Bentonit-Zement-Gemisch).

Für jeden Baugrundtyp wird auf vier Testfeldern mit einer Fläche von jeweils ca. 8 m x 10 m die in-situ-Festigkeit des Bodens vor und nach einer simulierten Kampfmittelerkundung bestimmt (s. Bild 2).

Jedes der vier Testfelder repräsentiert eine Kombination der o. g. Bohrverfahren und Bohrlochverfüllungen (Testfelder HB: Hohlbohrschnecke, Bohrgut / HZ: Hohlbohrschnecke, Zement / VB: Verrohrung, Bohrgut / VZ: Verrohrung, Zement).

Zuerst wird in jedem Testfeld die Vorher-Festigkeit mittels Sondierungen bestimmt. Danach werden im 0,5 m-, 1,5 m- und 3,0 m-Rasterabstand Bohrungen abgeteuft. Bei jeder Bohrung wird eine Mischprobe des Bodens genommen und später im geotechnischen Labor nach DIN EN ISO 14688 untersucht. Auf den Testfeldern wird anschließend im Zentrum der Bohrraster die Nachher-Festigkeit des Bodens wiederum mittels Sondierungen bestimmt. Weitere Sondierungen werden im Bereich des 1,5 m-Rasters senkrecht zu einer fiktiven, auf Kampfmittel erkundeten Spundwandachse (s. rote, gestrichelte Linie in Bild 2) abgeteuft, um so den Abstand zu ermitteln, bis zu dem der Baugrund noch als gestört anzusehen ist. Der Einfluss der Kampfmittelsondierung auf den Baugrund ergibt sich aus dem Verhältnis von Nachher- zu Vorher-Festigkeit.



**Bild 2:** Aufbau eines Testfeldes

Im September 2013 wurde auf dem von der Hamburg Port Authority betriebenen Spülfeld Ellerholz ein Feldversuch für den Baugrundtyp „nichtbindiger Boden, über Grundwasser, locker bis mitteldicht gelagert“ durchgeführt. Bis in eine Tiefe von 3 m unter Spülfeldoberkante wurden auf den vier Testfeldern insgesamt 52 Bohrungen abgeteuft und die Vorher- und Nachherfestigkeit mittels 72 Sondierungen mit der Leichten Rammsonde (DPL) bis in eine Tiefe von bis zu 4 m erkundet.

Weitere Feldversuche sowie eine Begleitung geeigneter WSV-Projekte, bei denen eine Kampfmittelerkundung durchgeführt wird, sind in den kommenden Jahren geplant.

Mittels numerischer Simulation soll der Einfluss von Kampfmittelsondierungen auf den Baugrund qualitativ abgeschätzt werden. Die Simulationsergebnisse sind an den Feldversuchen zu validieren.

### 3 Ergebnisse

Als Ergebnis einer Sichtung der Kampfmittelverordnungen der einzelnen Bundesländer wurde eine Liste der geotechnisch relevanten Anforderungen erzeugt, die die Planungsgrundlage für die Feldversuche ist. Auf Grundlage der Fragebogenaktion wurde diese Liste 2014 überarbeitet.

Der Feldversuch vom September 2013 zeigt, dass bei Kampfmittelsondierungen im nichtbindigen, locker bis mitteldicht gelagerten Boden über Grundwasser



- es sowohl zur Auflockerung als auch (bei einer Bohrlochverfüllung mit Bentonit-Zement-Gemisch) zur Verdichtung des Baugrundes kommen kann,
- der Einfluss der Bohrlochverfüllung größer ist als der des Bohrverfahrens und dass
- vermutlich eine Tiefenabhängigkeit besteht.

Um eine mögliche Tiefenabhängigkeit genauer erkunden zu können, sollen die simulierten Kampfmittelbohrungen sowie die Vorher- und Nachhersondierungen zukünftig bis auf 6 m (bisher: 3 m) abgeteuft werden. Zusätzlich soll - aufgrund der in der Fragebogenaktion gewonnenen Erkenntnisse - der Feldtest um ein weiteres, fünftes Testfeld erweitert werden, sofern dies die örtlichen Verhältnisse zulassen. In diesem Testfeld sollen die Bohrungen mit Spülung niedergebracht und anschließend mit Bohrgut verfüllt werden.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

- 2015: Feldversuch am NOK (Wechselagerung aus bindigen und nichtbindigen Böden), Begleitung einer Kampfmittelerkundung für eine Spundwand am RHK (Übergang Boden/Fels)
- 2016/17: weitere Feldversuche an nichtbindigen, bindigen und organischen Böden; evt. weitere (Labor-)Versuche; numerische Simulation
- 2018: zusammenfassende Auswertung

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2018.

#### **5 Literatur**

-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

-/-

## **Bestimmung des Tragverhaltens von offenen Stahlrohrpfählen**

**Netzplan-Nr.:** A39550170378

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. M. Kidane, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Geotechnik Nord (K1)

**E-Mail:** mussie.kidane@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Offene Stahlrohrpfähle werden in der WSV vornehmlich bei kombinierten Rohrspundwänden, Tiefgründungen im offenen Wasser sowie als Anlegedalben eingesetzt. Die Belastungsrichtungen variieren stark zwischen vorwiegend vertikal und vorwiegend horizontal. Des Weiteren werden offene Stahlrohrpfähle mit ähnlichen Durchmessern wie im Bereich der WSV als Gründungselemente von Offshore-Windenergieanlagen eingesetzt.

In der Fachwelt ist das Verständnis für das physikalische Verhalten von offenen Stahlrohrpfählen bei unterschiedlichen Durchmessern nur unzureichend erschlossen. Entsprechend unterscheiden sich beispielsweise Angaben in diesbezüglichen maßgeblichen Empfehlungen: die Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ (EAP) weichen deutlich von den Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen (EAU) ab. Diese führen zu unterschiedlichen rechnerischen axialen Pfahltragfähigkeiten, wodurch sich Unsicherheiten bei der Dimensionierung dieser Bauwerke ergeben.

Nachfolgende geotechnischen Inhalte sind in der derzeitigen wissenschaftlichen Diskussion und bedürfen einer näheren sowie systematischen Betrachtung, um Bauwerke wirtschaftlich und insbesondere sicher bauen zu können:

##### **Pfropfenbildung und innere Mantelreibung:**

Derzeitig wird oft davon ausgegangen, dass ab einem Rohrdurchmesser von ca. 1,5 m keine maßgebliche Pfropfenbildung im Pfahlinneren stattfindet sondern der Pfahl über innere und äußere Mantelreibung trägt. Das Auftreten eines Pfropfens innerhalb eines offenen Rohrpfales bei der Rammung verändert dessen Tragverhalten maßgeblich. Neben den Eigenschaften des anstehenden Bodens ist die aufgebrachte Rammenergie ein maßgebliches Kriterium für die mögliche Pfropfenbildung. Dies ist derzeit nur unzureichend erforscht.

##### **Anwachsen:**

Bei einigen dynamischen Pfahlprobelastungen konnte durch re-strikes (erneute Probelastung zu einem späteren Zeitpunkt) an Rohrpfählen mitunter eine zeitabhängige Zunahme der Tragfähigkeit beobachtet werden. Die Bandbreite reicht jedoch oft von 1- (keine Zunahme) bis etwa 2-fachen Zunahme in ähnlichen Zeiträumen. Verlässliche Ergebnisse und Ansätze liegen nicht vor.

##### **Statische Pfahltragfähigkeit:**

Die rechnerisch eindeutige und zutreffende Prognose der statischen Pfahltragfähigkeit ist derzeit nicht möglich. Verschiedene Prognoseverfahren existieren zwar, jedoch wurden diese zum einen nur an wenigen Pfahlprobelastungen kalibriert und führen zum anderen oft zu unterschiedlichen Ergebnissen bei gleichen vorgegebenen Randbedingungen.

##### **Verhalten unter zyklischer Belastung:**

Das Tragverhalten und die Auswirkung zyklischer Lastamplituden auf das Boden- sowie das Boden-Pfahl-Verhalten sind derzeit nur unzureichend erforscht. Unterschiedliche Ansätze liegen vor, welche jedoch große Streubreiten in den Ergebnissen liefern und mitunter auf vergleichsweise geringer Datengrundlage basieren. Diese Thematik ist insbesondere für die Gründungselemente von Offshore-Windenergieanlagen von großem Interesse.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Erweiterte Kenntnisse zu den o. g. Punkten erlauben eine wirtschaftliche und sichere Bemessung von offenen Stahlrohrpfählen für WSV-Bauwerke sowie von Gründungen von Offshore-Windenergie-

anlagen. (Die BAW unterstützt das BSH bei der Genehmigung von Offshore-Windenergieanlagen und Konverterplattformen mit ihrem Expertenwissen.)

### 1.3 Untersuchungsziel

Bemessungsmethoden zum Pfahltragverhalten sollen unter Berücksichtigung der vorgenannten physikalischen Zusammenhänge (siehe 1.1) ermittelt bzw. angepasst werden.

## 2 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen von WSV-Baumaßnahmen soll der Rammvorgang von offenen Stahlrohrpfählen messtechnisch begleitet werden, um die Pfropfenbildung, die innere und äußere Mantelreibung, den Spitzenwiderstand sowie entstehende Porenwasserüberdrücke zu ermitteln. Die Begleitung soll an einer Modellfamilie bestehend aus Stahlrohrpfählen mit Durchmessern von etwa 70 cm, 150 cm und 250 cm erfolgen. Zusätzliche Drucksondierungen im Pfahlinnern sind vorgesehen.

Durch dynamische und statische Probelastungen soll das Tragverhalten ermittelt werden. Hierdurch wird zudem ein direkter Vergleich der Ergebnisse zur Tragfähigkeit aus verschiedenen Prognoseverfahren ermöglicht.

Zur Ermittlung von Anwachseffekten sollen dynamische Probelastungen zu späteren Zeitpunkten ( $t = 28 \text{ d}$ ,  $180 \text{ d}$ ) durchgeführt werden. Zusätzlich sollen in Labor- und Modellversuchen die Anwachseffekte unter definierten Bedingungen (Chemismus, Biologie, etc.) untersucht werden. Ziel ist die Bestimmung der Faktoren, welche einen maßgeblichen Einfluss auf die Tragfähigkeitssteigerung von gerammten Rohrpählen über die Zeit haben.

Der Einfluss aus zyklischen horizontalen Belastungen auf das Pfahltragverhalten soll durch hydraulische Pressen mit unterschiedlichen Lastzyklen sowie Amplituden simuliert werden. Dies kann bei entsprechenden Randbedingungen von Land aus erfolgen oder durch Setzen eines Reaktionspfahles. Die o. g. messtechnische Instrumentierung wird hierfür weiter verwendet und ggf. ergänzt. Durch die Nachrechnungen der Versuchsergebnisse mit derzeit gängigen, jedoch bisher nicht validierten Prognoseverfahren, sollen die vorhandenen Bemessungsmethoden zyklisch-lateral belasteter Pfähle verbessert werden.

## 3 Ergebnisse

Das FuE-Vorhaben wurde im November 2013 gestartet.

In einer Literaturrecherche wurden Ergebnisse bisher durchgeführter statisch- sowie zyklisch-lateraler Pfahlprobelastungen gesichtet. Des Weiteren wurden vorhandene Bemessungsmethoden für lateral belastete Gründungspfähle den zugrunde liegenden Feld- sowie Laborversuchen gegenübergestellt, nach denen diese kalibriert worden sind.

Aus der Literatur wurden Ergebnisse von Pfahlprobelastungen, in welchen die zeitliche Traglastentwicklung gerammter Pfähle in axialer Richtung bestimmt wurde, zusammengetragen. Mögliche Einflüsse auf die Tragfähigkeitssteigerung von Rohrpählen wurden definiert. Die Ergebnisse aus einem Bauvorhaben des WSA Wilhelmshaven (WSA-WHV) wurden in dieser Auswertung ergänzt (Bild 1). Laborversuche zur Untersuchung einzelner Einflüsse des zeitlich veränderlichen Pfahltragverhaltens wurden konzipiert. Die Entwicklung eines dafür angepassten Rahmenschergeräts wurde begonnen.

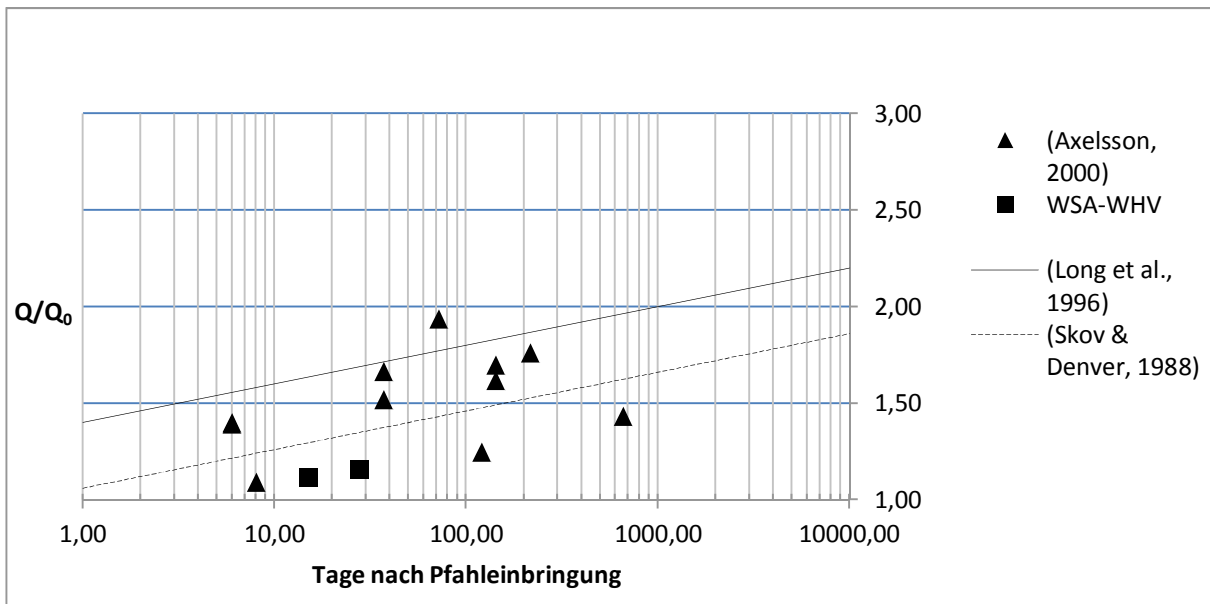


Bild 1: Aus Messungen ermittelter und approximierter Tragfähigkeitszuwachs ( $Q/Q_0$ ) von Verdüngungspfählen, mit  $Q_0$ : Pfahltragfähigkeit nach ca. einem Tag

Feldversuche zur Untersuchung des axialen und lateralen Pfahltragverhaltens wurden geplant. Erste Gespräche zur Durchführung der Feldversuche im Rahmen von geeigneten Baumaßnahmen der WSV fanden bereits statt.

**4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2015 - 2017: Durchführung sowie Auswertung der Feldversuche und Durchführung der weiteren Forschungsinhalte

Laufzeit des Vorhabens: 11/2013 bis 2017.

**5 Literatur**

-/-

**6 Veröffentlichungen**

-/-

## **Einfluss der Vorlandvegetation auf den Hochwasserabfluss und die Sohlstabilität in Bundeswasserstraßen**

**Netzplan-Nr.:** A39530110036

**Projektleiter:** Dr.-Ing. M. Schröder, Abt. Wasserbau im Binnenbereich, Referat Flussbau (W2)

**E-Mail:** michael.schroeder@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

In der mehrdimensionalen Modellierung von Fließgewässern wird die Modellähnlichkeit im Wesentlichen durch die Kalibrierung von Rauheitsparametern erzielt, die den Strömungswiderstand des Gewässerbettes parametrisieren. Während der Strömungswiderstand eines sandig-kiesigen Mittelwasserbettes verhältnismäßig stringent aus der Sieblinie ermittelt werden kann, sind die Verhältnisse im Fall von über- und durchströmter Vegetation, die man außerhalb des Mittelwasserbettes im Bereich der Vorländer antrifft, wesentlich komplexer. Dies wird besonders deutlich an speziellen Eigenschaften von Pflanzen, wie Flexibilität unter Strömungsbelastung oder jahreszeitliche Veränderung der Belaubung. Darüber hinaus müssen für den Fall durchströmter Vegetation grundsätzlich andere Gleichungen als für den Fall überströmter Vegetation verwendet werden, da der Strömungswiderstand im ersten Fall mit steigendem Abfluss zunimmt, während er im zweiten Fall abnimmt.

In den 80er-Jahren des 20. Jahrhunderts wurden im Rahmen eines DFG-Schwerpunktprogramms umfangreiche Forschungen initiiert, die sich genau mit diesem Problem - dem Strömungswiderstand von durchströmter Vegetation - befassten. Die Ergebnisse der Forschung mündeten in dem DVWK-Merkblatt 220 („Hydraulische Berechnung von Fließgewässern“, 1991). Mit dem Abschluss des DFG-Schwerpunktprogramms wurden aufgrund der bereits angesprochenen Komplexität des Themas bei Weitem nicht alle Forschungsziele erreicht, so dass sich bis heute zahlreiche Forschungsarbeiten mit dem Strömungswiderstand von Pflanzen beschäftigen. Hierbei stehen häufig Teilaspekte im Vordergrund, wie Flexibilität von Pflanzen oder neue Berechnungsansätze für über- und durchströmten Bewuchs, während sich andere Arbeiten mit der Katalogisierung von Vegetationsformen und deren Fließwiderstandsverhalten sowie mit der Erfassung von Bewuchsformen mithilfe der Fernerkundung beschäftigen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

In der Planung und Durchführung von Unterhaltungs- und Ausbaumaßnahmen an den frei fließenden und staugeregelten Bundeswasserstraßen sowie bei der Bewertung von Baumaßnahmen Dritter sind auch immer Hochwasserabflüsse zu betrachten, bei denen häufig dicht bewaldete Vorlandflächen das Abflussgeschehen dominieren. Die möglichst genaue rechnerische Berücksichtigung des Strömungswiderstands der Vegetation über ein weites Spektrum von Abflusszuständen ist bedeutend für die Ermittlung von Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten und folglich für die Abschätzung von morphodynamischen Prozessen (Geschiebetransport, Sohlstabilität und Fehlstellenentwicklung). Insbesondere in den folgenden drei Situationen ist die Verwendung von physikalisch-wissenschaftlich fundierten Berechnungsansätzen zur Ermittlung des Strömungswiderstands von Pflanzen zwingend erforderlich:

- Die Kalibrierung eines Strömungsmodells erfordert für den Lastfall Hochwasserabfluss auch entsprechende Naturmessdaten. Im Bereich von extremen Hochwasserabflüssen sind allerdings Naturmessdaten nur spärlich oder überhaupt nicht verfügbar, so dass häufig mit dem bei niedrigeren Abflüssen kalibrierten Strömungsmodell eine Extrapolation auf extreme Hochwasserstände erfolgen muss.
- Bei der instationären Strömungsmodellierung einer Hochwasserganglinie variiert der Strömungswiderstand von durch- und überströmter Vegetation in einem sehr weiten Bereich und kann mit konstanten Beiwerten der einfachen Fließgesetze nach Manning-Strickler, Nikuradse usw. nicht mehr beschrieben werden.
- Die planerischen Maßnahmen Dritter, die beispielsweise als Ausgleichsmaßnahmen im Vorlandbereich durchgeführt werden sollen, sind hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Belange der

Schifffahrt sowie der Gewässerunterhaltung zu bewerten. Solche Maßnahmen haben häufig den Hochwasserschutz oder ökologische Aufwertungen zum Ziel (z. B. Veränderung des Hochwasserquerschnitts durch die Rückverlegung von Deichen oder Anbindung von nicht durchströmten Altarmen bzw. Anpflanzung oder Tolerierung einer auetypischen Vegetation). Eine Kalibrierung von Rauheitsparametern zur Beschreibung des Strömungswiderstands von Vegetation ist bei planerischen Maßnahmen vom Grundsatz her nicht möglich.

### 1.3 Untersuchungsziele

Das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Vorlandvegetation“ verfolgt die Ziele:

- Methoden zur Erfassung, Beschreibung und Parametrisierung der Vegetation zusammenzustellen und hinsichtlich der praktischen Eignung für den Bereich der Bundeswasserstraßen zu bewerten und zu erproben,
- Berechnungsverfahren gemäß dem aktuellen Stand der internationalen Forschung bereitzustellen und ggf. weiterzuentwickeln, die im Rahmen der mehrdimensionalen mathematisch-numerischen Modellierung zur Berücksichtigung des Widerstandsverhaltens durch- und überströmter Vorlandvegetation geeignet sind und
- typische Vegetationsformen im Vorlandbereich der Fließgewässer zu katalogisieren.

## 2 Untersuchungsmethoden

Aufgrund der zahlreichen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Strömungswiderstands von Vegetation werden die verfügbaren Forschungsergebnisse in einem ersten Schritt und dann weiterhin kontinuierlich aus der einschlägigen Literatur entnommen. Auf der Grundlage dieser Literaturanalyse erfolgt im zweiten Schritt die Identifikation des heutigen Forschungsbedarfs. Hierbei steht die anwendungsorientierte Forschung im Vordergrund, deren Ergebnisse möglichst unmittelbar zur Qualifizierung der in der BAW eingesetzten mehrdimensionalen Berechnungsverfahren verwendet werden können. Eher grundlagenorientierte Forschungsarbeiten werden gefördert, beispielsweise durch die Kooperation mit Forschungsinstituten der Universitäten und Hochschulen. Durch eigene Aufträge an Forschungseinrichtungen wird die Durchführung von Modellversuchen in Wasserbaulaboratorien und von Naturversuchen im Bereich der Bundeswasserstraßen vergeben. Mit diesen Forschungsergebnissen erhält die BAW eine Datengrundlage, die unmittelbar zur weiteren Qualifizierung der eigenen Modellverfahren eingesetzt werden kann.

## 3 Ergebnisse

Das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen und das Aachener Ingenieurbüro *valitec simulations* wurden zum planmäßigen Abschluss des FuE-Projektes beauftragt, die durchgeführten Messungen der vergangenen Jahre zu dokumentieren und auszuwerten.

In 2014 fanden zwei Sitzungen der DWA-Arbeitsgruppe WW-3.1 „Hydraulische Berechnung von Fließgewässern mit Vegetation“ in Braunschweig und in Cottbus statt. Die Arbeitsgruppe hat das Ziel, den Stand der Technik bei der Berücksichtigung des Fließwiderstands von Vegetationsrauheiten in der mehrdimensionalen Strömungsmodellierung zu beschreiben und in einem DWA-Merkblatt Empfehlungen für die praktische Umsetzung der Methoden zu geben. Der Gelbdruck des Merkblatts wird für 2016 angestrebt.

Im Oktober 2014 wurde eine Bachelorarbeit vergeben und in der BAW betreut, mit der Aufgabe für den Bereich der Wormser Versuchstrecke zur Erprobung von technisch-biologischen Ufersicherungen modelltechnische Untersuchungen durchzuführen (vgl. FuE-Projekt der Abteilung Geotechnik, Frau Fleischer und siehe Bilder 1 bis 3). Im Rahmen der Arbeit sollten die neuesten im Berechnungsverfahren implementierten Methoden zur Ermittlung des Fließwiderstands von überströmter und flexibler Vegetation hinsichtlich ihrer praktischen Eignung erprobt werden.



Bild 1: Feld 8 der Versuchsstrecke „Alternative Ufersicherungen“, Rhein bei Worms (Foto vom 22.07.2013)

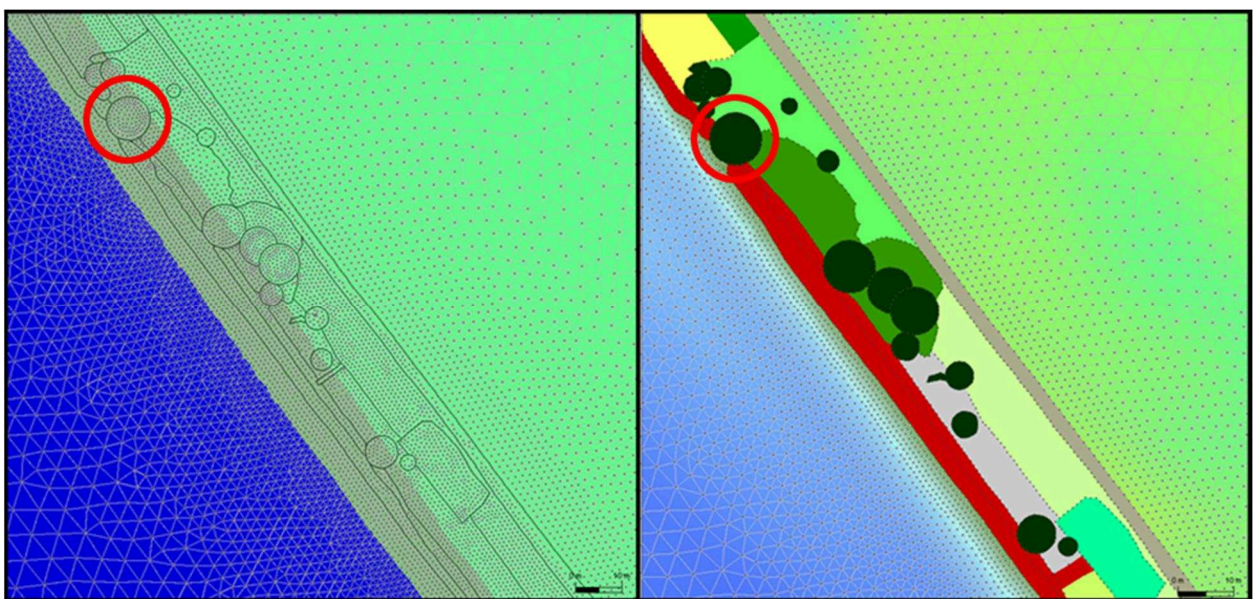


Bild 2: Umsetzung der Vegetation auf dem Berechnungsgitter

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Der Projektabschluss konnte in 2014 nicht realisiert werden, da die Abschlussdokumentation des IWW - RWTH Aachen noch nicht vorlag. Die Erstellung des Abschlussberichts wird sich daher noch bis ca. Juni 2015 verzögern.

Laufzeit des Vorhabens: 2000 bis 2015.

#### 5 Literatur

-/-

#### 6 Veröffentlichungen

Servouse, P. (2015): Modelluntersuchungen technisch-biologischer Ufersicherungen in der Versuchsstrecke Worms; Bachelor-Arbeit, Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft

## **Untersuchung der Prognosefähigkeit von mehrdimensionalen Feststofftransportmodellen an spezifischen Fragestellungen aus dem Flussbau**

**Netzplan-Nr.:** A39530110064

**Projektleiterin:** Dr.-Ing. R. Kopmann, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Numerische Verfahren im Wasserbau (W5)

**E-Mail:** rebekka.kopmann@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Bei den durch die BAW durchgeführten Untersuchungen zur Wirkungsweise flussbaulicher Maßnahmen muss zunehmend die morphodynamische Flussentwicklung einbezogen werden. Mehrdimensionale numerische Feststofftransport-Modelle (FT-Modelle) finden zunehmend Anwendung zur Lösung von instationären, großskaligen Problemen, da sie bereits einen beachtlichen Entwicklungsstand erreicht haben. Allerdings setzt eine erfolgreiche Anwendung dieser Verfahren ein grundlegendes Verständnis der physikalischen Phänomene sowie große Erfahrung in der numerischen Modellierung voraus. Dies ist bedingt durch die Vielfalt und enorme Komplexität der morphodynamischen Phänomene (insbesondere durch Rückkopplungsprozesse zwischen Strömung und sich umlagernder Sohle) und durch deren phänomenspezifische Beschreibung mittels semi-empirischer Gleichungen. Während die Überprüfung von rein hydrodynamischen Modellsystemen an analytischen Lösungen durchgeführt werden kann, fehlen diese für komplexere morphodynamische Prozesse. Die Zuverlässigkeit dieser Modellklasse ist daher an die Verifikation und Validierung durch Fallstudien und an die Erfahrung des Programmentwicklers und -anwenders gebunden. Verifikation, Validierung und Kalibrierung der Modelle müssen daher sehr sorgfältig und ausführlich durchgeführt werden. Für die BAW ist der Nachweis der Anwendbarkeit und der Grenzen für die praxisrelevanten Fragestellungen zu erbringen. Zentral ist dabei die Frage, mit welcher Sicherheit FT-Modelle bei welchen Fragestellungen zur Prognose von Sohlentwicklungen eingesetzt werden können.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Der Einsatz von prognosesicheren, auf die Fragestellungen der WSV zugeschnittenen FT-Modellen sichert die effiziente und qualitativ hochwertige Bearbeitung von Projekten mit morphodynamischen Fragestellungen. Als Ergänzung zu Naturuntersuchungen und gegenständlichen Modellen ist dieses Werkzeug optimal geeignet, die räumliche und zeitliche Wirkung vieler verschiedener Einflussgrößen mittels Szenarienrechnungen aufzuzeigen. Dies ist insbesondere im Zusammenhang mit Langzeitprognosen hilfreich und verbessert die Bewertung von Maßnahmen und deren Qualitätskontrolle.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel des Projektes ist es, die Eignung numerischer FT-Modelle zur Abbildung grundlegender morphologischer Prozesse anhand von Messungen aus Labormodellen zu beurteilen. Als Ergebnis werden Weiterentwicklungspotenziale sowie eine beschleunigte Einführung dieser Modelle im Rahmen der Projektarbeit erwartet. Dafür werden folgenden Untersuchungsschwerpunkte verfolgt:

- Untersuchungen an Labormodellen mit beweglicher Sohle für die Herstellung von geeigneten Messdatensätzen zur Standard-Verifikation von FT-Modellen.
- Validierung bestehender FT-Modelle anhand geeigneter Messdatensätze. Ziel ist es, die Anwendbarkeit und Grenzen der Modelle aufzuzeigen. Dazu gehört auch die Einschätzung der erreichten Genauigkeit mit Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung.
- Weiterentwicklung bestehender FT-Modelle in Zusammenarbeit mit Universitäten.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Im Jahr 2014 wurde der Schwerpunkt auf die Einschätzung der Genauigkeit von FT-Modellen gelegt. Dafür wurde im Rahmen einer Kooperation mit der RWTH Aachen das algorithmische Differenzieren (AD) für das TELEMAC Programmsystem weiter vorangetrieben. Hierbei im Besonderen der Aspekt der automatischen Kalibrierung.



### 3 Ergebnisse

Die Kalibrierung ist ein zeitaufwändiger und insbesondere bei der Feststofftransportmodellierung mit den vielen zu kalibrierenden Parametern ein nicht eindeutiger Vorgang. Eine automatische Kalibrierung nach festgelegten Kriterien könnte die Bearbeitungsdauer erheblich verkürzen und die Abhängigkeit von der Erfahrung des Modellierers reduzieren. Mit Hilfe der algorithmischen Differenzierung (AD) können sehr effizient alle notwendigen Gradienten für die Optimierungsaufgabe zur Verfügung gestellt werden. Für TELEMAC wurde eine AD Version erstellt und für verschiedene Beispiele angewendet (Merkel, Riehme, Naumann 2013, 1 und 2).

Die in einer Masterarbeit (Schäfer 2014) begonnenen Arbeiten zur automatischen Optimierung wurden um zwei weitere Rinnenbeispiele mit gekoppelter Hydro- und Morphodynamik ergänzt. Das erste Beispiel ist eine BAW-Rinne mit einer Einschnürung und Aufweitung, bei der sich im Einschnürungsbereich ein Kolk und im Aufweitungsbereich eine Düne in der ursprünglich planen Kiessohle ausbildet. Das zweite Beispiel ist eine Rinne der UK Coastal Research Facility (UKCRF) / HR Wallingford, in der auf einer nicht erodierbaren Sohle ein Sandhügel von einer Strömung weitertransportiert und verformt wird (García-Hermosa 2008). In beiden Fällen wurde für die automatische Kalibrierung von vier Eingangsparametern ein Zwillingsexperiment verwendet. Das bedeutet, dass zunächst eine Simulation durchgeführt wurde mit als optimal angesehenen Werten für die Eingangsparameter. Diese Werte entstammten einer klassischen Kalibrierung. Anstelle von Messwerten wird bei einem Zwillingsexperiment das vorab erzeugte numerische Ergebnis als Optimierungsziel verwendet. Die automatische Kalibrierung wird dann von typischen Werten für die Kalibrierungsparameter begonnen. Die Kalibrierung erfolgte über die Minimierung einer least-square Zielfunktion  $f(x)$ , die mit der Differenz der simulierten Sohllagen  $Z$  zu den Sohllagen des Zwillingsexperiments  $Z^{twin}$  definiert wurde.

$$\min f(x) = \frac{1}{2} |Z(ks, MPM, \theta_{crit}, dm) - Z^{twin}|_2^2$$

Die Optimierung wurde beendet, wenn die Zielfunktion einen Wert kleiner  $10^{-15}$  erreichte, die relative Reduktion zwischen 2 Optimierungsschritten zehnmal kleiner der Maschinengenauigkeit entsprach oder die Anzahl der Optimierungsschritte größer 150 betrug.

Tabelle 1 zeigt für beide Rinnenversuche die Start-, Ziel und erreichten Werte, sowie die Variationsbreite (=Grenzen) für die vier Kalibrierungsparameter Rauheitsparameter  $ks$ , Vorfaktor für die Meyer-Peter und Müller Transportformel MPM, kritischer Shields Parameter  $\theta_{crit}$  und mittlerer Korndurchmesser  $dm$ .

	Anfangswerte	Werte des Zwillingsexperiments	Grenzen	Wert aus der Optimierung
<b>Rauheitsbeiwert <math>Ks</math> [m]</b>	0.03 0.01	0.0141 0.025	0.001 – 0.1 0.01 – 0.1	0.0141 0.0249971
<b>MPM-Koeffizient [-]</b>	6 6	5 5	1 – 10 1 – 10	4.99999996 5.0008574
<b>Kritischer Shields Parameter <math>\theta_{crit}</math> [-]</b>	0.047 0.05	0.03 0.03	0.01 – 0.07 0.01 – 0.07	0.03 0.0300093
<b>Mittlerer Korndurchmesser <math>dm</math> [m]</b>	0.003 0.0006	0.00551 0.00045	0.001 – 0.05 $10^{-4}$ – 0.005	0.00551 0.0004498

Tabelle 1: Start-, Ziel- und erreichte Werte und Grenzen für die vier Kalibrierungsparameter für die BAW Einschnürungsrinne (obere Reihe) und die Rinne mit Sandhügel (untere Reihe)

Die mit der Optimierung erreichten Werte stimmen für beide Rinnen sehr gut mit den angestrebten Werten aus den Zwillingsexperimenten überein. Die automatische Kalibrierung war somit erfolgreich. Bild 1 zeigt den Verlauf der Kalibrierungsparameter (links) und der Zielfunktion (rechts) in Abhängig-

keit von der Anzahl der Iterationen für die Rinne mit Sandhügel. Hier zeigt sich, dass das Konvergenzverhalten bei der Optimierung noch verbessert werden könnte. Für große Modelle sind Iterationsanzahlen von über 100 mit erheblichem Rechenaufwand verbunden. Auch hat sich bei den Untersuchungen gezeigt, dass die Optimierungsalgorithmen je nach Startwerten in lokale Minima laufen können und dann nicht mehr weiter konvergieren. Globale Optimierungsalgorithmen sowie angepasste Zielfunktionen sollen bei der automatischen Kalibrierung von Projektbeispielen helfen.

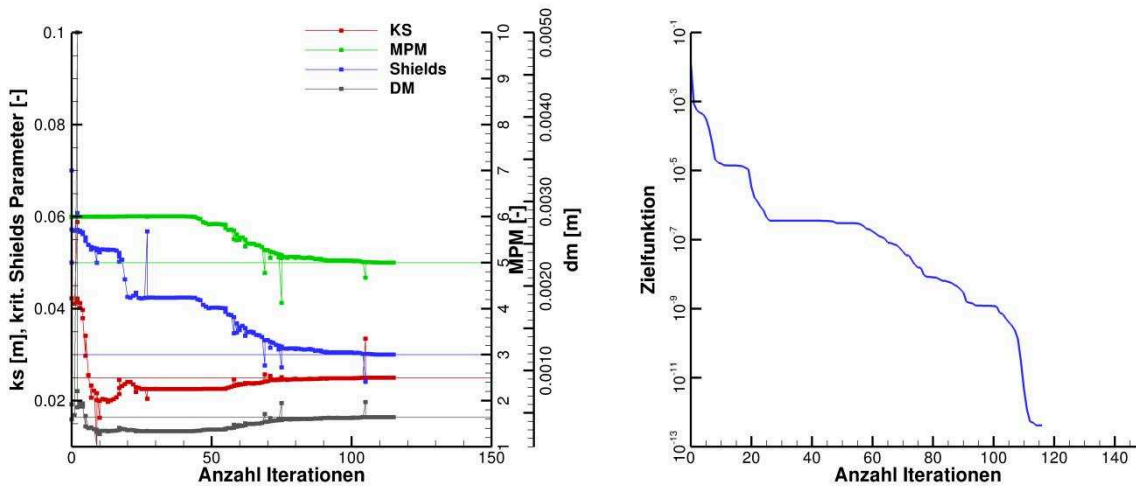


Bild 1: Anpassung der Kalibrierungsparameter (links) und die Entwicklung der Zielfunktion (rechts) während des Optimierungsprozesses für die Rinne mit Sandhügel

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Arbeiten in dem Forschungsvorhaben sind abgeschlossen und werden in 2015 in einem Abschlussbericht zusammengefasst.

Laufzeit des Vorhabens: 2002 bis 2015.

#### 5 Literatur

García-Hermosa, M.,I. (2008): Morphodynamics of Sand Mounds in Shallow Flows. PhD Thesis University of Oxford, UK.  
 Merkel, U.H., Riehme, J., Naumann, U. (2013): Rückrechnung von Rand- und Anfangsbedingungen mit Telemac und Algorithmischer Differentiation. Wasserwirtschaft H.12, 2013, S.22-27.  
 Merkel, U.H., Riehme, J., Naumann, U. (2013): Reverse Engineering of Initial and Boundary Conditions with TELEMAC and Algorithmic Differentiation. Proceedings XX<sup>th</sup> Telemac-Mascaret User Conference 2013, 16.-18.10.2013, Karlsruhe.  
 Schäfer, M. (2014): Erprobung von Optimierungsalgorithmen für die Kalibrierung eines Finite-Elemente Strömungsmodells auf Basis von Gradienten. Masterarbeit Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

#### 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes**

**Netzplan-Nr.:** A39530170001

**Projektleiter:** Dr.-Ing. M. Schröder; Dr.-Ing. S. Wurms (Bearbeiter),  
Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat Flussbau (W 2)

**E-Mail:** michael.schroeder@baw.de, sven.wurms@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

Abflussprojektionen für den Rhein, zeigen, dass als eine Auswirkung des Klimawandels die Häufigkeit und Dauer extremer Abflussverhältnisse in der fernen Zukunft (Jahre 2071 bis 2100) zunehmen könnten. Bei extremen Niedrigwasserabflüssen ist eine zunehmende Beeinträchtigung der Schifffahrt festzustellen, wie dies beispielsweise während des Niedrigwassers 2003 zu beobachten war. Einerseits reduziert sich in solchen Fällen die maximal mögliche Abladetiefe, was unmittelbare Folgen für die Wirtschaftlichkeit des Transports per Schiff hat. Andererseits kommt es aber auch zu Breitereinschränkungen, die durch Untiefen in der Fahrrinne verursacht werden. Betroffen hiervon wären die Sicherheit und Leichtigkeit, mit der die Schifffahrt dann noch in Engpassbereichen zu navigieren vermag.

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Zur Identifikation von Anpassungsmaßnahmen an die Folgen des Klimawandels bedarf es des Wissens um die Sensitivität des Gesamtsystems Wasserstraße, insbesondere der hydro- und morphodynamischen Komponenten gegenüber veränderten hydrologischen Eingangsgrößen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens KLIWAS werden durch Anwendung eines Multimodellansatzes erstmalig belastbare Abflussprojektionen bis zum Jahr 2100 an den Hauptpegeln des Rheins in Form von Ergebnisbandbreiten generiert. Die Systemsensitivität gilt es daher konsequenterweise für die gesamte Bandbreite möglicher zukünftiger Abflussänderungen zu untersuchen. Dies wird zunächst exemplarisch an der Pilotstrecke Mainz bis St. Goar (Rhein-km 493,0 bis 557,5) durchgeführt.

2D-morphodynamische Berechnungen über die gesamte Länge der Pilotstrecke befinden sich heute im Bereich des technisch realisierbaren, jedoch sind Langzeitsimulationen, wie sie vor dem Hintergrund des Themas Klimawandel erforderlich sind, bisher nur mit deutlichen Abstrichen bezüglich der möglichen Feinheit der Modelldiskretisierung durchzuführen. In diesem Zusammenhang sind geeignete Strategien zu identifizieren, mit welchen morphodynamische Langzeitsimulationen in hinreichender Prognosequalität bei vertretbaren Rechenzeiten auf den zur Verfügung stehenden Großrechnern realisierbar sind.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Aus dem Projekt resultieren Aussagen, mit welchem Aufwand, welche Verbesserungen für die Schifffahrt bei klimabedingt möglicherweise reduzierten Niedrigwasserständen erzielt werden können. Damit stehen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) frühzeitig Anpassungsoptionen als Antwort auf die Auswirkungen eines möglichen Klimawandels zur Verfügung, mit welchen die Leistungsfähigkeit des Transportträgers Binnenschifffahrt auch bei extremen Niedrigwasserabflüssen erhalten werden kann. Erkenntnisse, welche aus den Modelluntersuchungen resultieren, sowie die im Rahmen dieses Projekts generierten, kalibrierten und validierten Modelle wurden parallel in dem WSV-Projekt „Abladeoptimierung Mittelrhein“ eingesetzt.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel dieses Projektes ist es, mögliche verkehrswasserbauliche Anpassungsoptionen zu identifizieren und zu bewerten, mit denen in Niedrigwasserperioden Mindestfließtiefen in freifließenden Wasserstraßen über längere Zeiträume als heute garantiert werden können. Auf einer Schwachstellenanalyse aufbauend werden erforderliche Ausbaumaßnahmen konzipiert und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet. Abschließend ist der Unterhaltungs- und Regelungsaufwand hinsichtlich des Gewinns für die Schifffahrt zu ermitteln.

## 2 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungen im Rahmen des Projektes werden exemplarisch für die Pilotstrecke von Mainz bis St. Goar (Rhein-km 493,0 bis 557,5) durchgeführt. Einer Analyse des heutigen Ausbauszustandes der Wasserstraßen mit Hilfe des 2D-hydro-/morphodynamischen Modellierungssystems TELEMAC-2D/Sisyphé folgt die Planung und Bewertung verschiedener Optionen eines Niedrigwasserausbaus.

Klimabedingte Änderungen der Niedrigwasserabflüsse fließen in Form von Bandbreiten projizierter Änderungen an den Haupt- und Nebenpegeln in eine hydrodynamische Sensitivitätsuntersuchung ein, anhand derer die abflussabhängige Entwicklung der Engpassbereiche innerhalb der Pilotstrecke abgeschätzt wird. Für den Pegel Kaub wird eine Änderung der für Ausbau und Unterhaltung der Wasserstraße relevanten Niedrigwasserkenngroße GIQ von +15 % bis -5 % in der nahen Zukunft (Jahre 2021 bis 2050) erwartet. Die Projektionen für die ferne Zukunft (Jahre 2071 bis 2100) zeigen Änderungen des GIQ von -10 % bis -25 % (Nilson et al., 2013). Im Rahmen morphodynamischer Modellrechnungen wird der zukünftige, klimabedingt veränderte Unterhaltungsaufwand in Form von Baggermengen zum Erhalt des Status quo der Wasserstraße sowohl für ein Null-Szenario ohne Klimaänderungen als auch für klimabedingt veränderte Randbedingungen abgeschätzt (Wurms, S., Schröder, M. 2013). Hierfür werden für die Zeiträume der nahen und fernen Zukunft insgesamt 13 instationäre Abflussprojektionen verwendet, welche sich jeweils über 30 Jahre erstrecken. Auf Grundlage der hydraulischen und morphologischen Streckenanalyse werden die Abschnitte identifiziert, die bei den einzelnen Niedrigwasserszenarien zu Engpassstellen für die Schifffahrt werden und in welchen Regelungsmaßnahmen erforderlich sind, um den Unterhaltungsaufwand zur Aufrechterhaltung der Fahrrinntiefen zu minimieren.

Damit die Leistungsfähigkeit der Binnenschifffahrt auch bei extremen Niedrigwasserabflüssen erhalten bleibt, ist der Ausbau der Wasserstraßen in Form einer durchgehenden, gegebenenfalls breitenreduzierten Niedrigwasserfahrrinne unter Ausnutzung vorhandener Übertiefen erforderlich. Die Lage und Mindestbreite dieser Fahrrinne wird im Rahmen des KLIWAS-Projekts 4.04 „Ermittlung von Fahrrinnenmindestbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt“ ermittelt. Mit dieser bautechnischen Variante werden hydro- und morphodynamische Berechnungen durchgeführt, um die Unschädlichkeit der Baumaßnahmen hinsichtlich eines Wasserspiegelverfalls im Bereich von Niedrig- bis Mittelwasserabfluss nachzuweisen sowie Verlandungs- oder Erosionsprobleme zu erkennen. Zusätzlich zu untersuchende Regelungsmaßnahmen sind neben den üblichen Buhnen und Parallelwerken flexible, nur bei Niedrigwasserabflüssen wirkende Buhnen und Schwellen (Wurms, S., Schröder, M. 2011).

Zur erforderlichen Beschleunigung der morphodynamischen Simulationen unter Beibehaltung der Ergebnissenauigkeit wird die Technik des morphologischen Faktors auf die Erfordernisse des instationär betriebenen Modells angepasst, welche sonst im Zusammenhang morphodynamischer Simulationen unter Verwendung stationärer oder periodischer Randbedingungen eingesetzt wird (Wurms, S., Schröder, M. 2012).

## 3 Ergebnisse

Die Untersuchung der potenziellen Wassertiefen innerhalb der Fahrrinne unter Verwendung des Status Quo der Wasserstraße zeigt, dass in der Pilotstrecke Mainz bis St. Goar mit einer Verschärfung der Engpassituation im Falle sinkender Niedrigwasserabflüsse zu rechnen ist. Während bis zu einer Verringerung des GIQ um 10 % aufgrund der vorhandenen Tiefenreserven in der Fahrrinne überwiegend ein Anwachsen der Volumina der bereits existierenden Fehlstellen zu erwarten wäre, würden bei einer weiteren Verringerung zahlreiche neue Fehlstellen in bislang unkritischen Fahrrinnenbereichen auftreten.

Die morphodynamischen Berechnungen zeigen, dass in der nahen Zukunft keine eindeutige Tendenz zur Erhöhung oder Verringerung der Unterhaltungsbaggermengen vorliegt, sollten die heutigen Fahrrinntiefen zukünftig aufrechterhalten werden. In der fernen Zukunft ist tendenziell mit einer Erhöhung der Unterhaltungsbaggermengen sowohl innerhalb des Geschiebefangs als auch der Fahrrinne zu rechnen. Die maximale projizierte Zunahme der Baggermengen innerhalb der Fahrrinne beträgt dabei +196 %. Ursächlich für den Anstieg der Baggermengen sind die folgenden Aspekte: Je ausgeprägter die Verringerung des aus den jeweiligen Abflussprojektionen resultierenden GIQs und damit

des für die Baggerungen relevanten Bezugswasserstands ist, desto größer fällt die Erhöhung der Baggermengen aus. Deutlich wird weiterhin der Zusammenhang zwischen erhöhten Abflusskennwerten für Mittel- und Hochwasser der Abflussprojektionen einerseits und einem Anstieg der erforderlichen Unterhaltungsmengen infolge des erhöhten Sedimenteintrags in die Strecke sowie einer erhöhten Sedimentdynamik andererseits.

Die verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen dienen dazu, den projizierten klimabedingten Mehraufwand auszugleichen, der zur Aufrechterhaltung der heutigen Fahrrinntiefen erforderlich wäre. Die Wirksamkeit der bislang im Rahmen der hydrodynamischen Modellierung identifizierten verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen wurde im 2D-morphodynamischen Modell untersucht. Als Randbedingung diente diejenige Abflussprojektion aus der fernen Zukunft, mit welcher der mit einem Wert von +196 % größte Anstieg der Unterhaltungsmengen innerhalb der Fahrrinne projiziert wurde. Eine mögliche Anpassungsoption ist die abgestufte Unterhaltung der Fahrrinne, d. h. einer auf reduzierter Breite durchgeführten Anpassung der Fahrrinne an den im Rahmen der genannten Abflussprojektion reduzierten Bezugswasserstand. Weiterhin wurden im morphodynamischen Modell Längswerke in den Bereichen Oestrich und Kemptener Fahrwasser untersucht, welche auf die Erhöhung der Schubspannungen und damit eine Verringerung der Anlandungsraten abzielen.

Durch die abgestufte Unterhaltung der Fahrrinne könnte eine deutliche Verringerung des erforderlichen Unterhaltungsaufwandes erzielt werden. Im betrachteten Szenario ließe sich der klimabedingte Anstieg der Baggermengen in der Fahrrinne zwischen Mainz und Trechtingshausen von insgesamt +196 % auf einen Wert von +122 % reduzieren. In Teilbereichen der untersuchten Strecke, z. B. der Teilstrecke Bingen, ließe sich durch die abgestufte Unterhaltung die klimabedingte Zunahme des Unterhaltungsaufwandes nahezu ausgleichen. In anderen Teilstrecken wäre die Wirkung teils weniger ausgeprägt. Hinsichtlich der Verringerung des klimabedingten Mehraufwands an Unterhaltung ist somit denkbar, die Anpassungsoption der abgestuften Unterhaltung der Fahrrinne auf ausgewählte Engpassbereiche zu begrenzen.

Durch ein Längswerk im Bereich der Rüdeshheimer Aue ließe sich der klimabedingte, projizierte Mehraufwand an Unterhaltung in der Teilstrecke Bingen von +137 % auf einen Wert von +69 % reduzieren und somit nahezu halbieren. Eine Kombination aus abgestuft unterhaltener Fahrrinne einerseits und Längswerken in den Bereichen Oestrich und Rüdeshheimer Fahrwasser andererseits würde insgesamt zu einer Verringerung der projizierten Zunahme des Unterhaltungsaufwands von +196 % auf einen Wert von +88 % führen. In einzelnen Teilstrecken könnte die klimabedingte Zunahme des Unterhaltungsaufwandes vollständig ausgeglichen werden.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2015: Erstellung des Abschlussberichts

Laufzeit des Vorhabens: 2009 bis 2015.

#### **5 Literatur**

Nilson, E.; Carambia, M.; Klein, B; Krahe., P. (2013): Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussregime und die Binnenschifffahrt im Rheingebiet. Koblenz, 2013. – BfG-Bericht, in Vorbereitung.

#### **6 Veröffentlichungen**

Wurms, S., Schröder, M. (2011): Untersuchungen zu verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen an extreme Niedrigwassersituationen. In: BMVBS (2011): KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland, Tagungsband zur 2. Statuskonferenz, 25. – 26. Oktober 2011, Berlin.

Wurms, S., Schröder, M. (2012): Evaluation of strategies for the acceleration of morphodynamic simulations against the background of waterways maintenance. In Murillo (Hrsg.), River Flow 2012, S. 1235 - 1241. San José, Costa Rica.

Wurms, S., Schröder, M. (2013): 2-D-morphodynamische Simulationen zur Anpassung des Verkehrswasserbaus an den Klimawandel. In: WasserWirtschaft 103 (2013) Nr. 12, S. 16-21.

## **Hydraulische Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen**

**Netzplan-Nr.:** A39530170002

**Projektleiter:** Dr. sc. techn. R. Weichert, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Wasserstraße und Umwelt (W1)

**E-Mail:** roman.weichert@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Bei zahlreichen Wehr- und Stauanlagen, welche zur Gewährleistung der Schifffahrt und/oder zur Nutzung der Wasserkraft errichtet wurden, besteht die Notwendigkeit zur Ergänzung von funktionsfähigen technischen Fischaufstiegsanlagen, um die ökologische Durchgängigkeit wieder herzustellen. Dabei ist die Bedingung für die Funktionsfähigkeit einer Fischaufstiegsanlage, dass sie für die große Mehrzahl der für die betrachtete Fließgewässerregion relevanten Fischarten durchgängig ist. Zur Bemessung von Fischaufstiegsanlagen wird auf Erfahrungswerte zurückgegriffen, die in technische Bemessungsregeln einfließen. Die Bemessung hat das Ziel, eine Strömungssituation zu erzeugen, die den Fischen ermöglicht, ein vorhandenes Querbauwerk zu überwinden.

Bei Planung und Bau von technischen Fischaufstiegsanlagen existieren bereits umfangreiche Erfahrungen vor allem für kleine und mittlere Fließgewässer, welche in entsprechenden Regelwerken zusammengefasst sind. Solche Regelwerke beziehen sich auf Erfahrungswerte aus den verschiedenen Studien der letzten Jahrzehnte und beinhalten eine Sammlung geometrischer Parameterintervalle aus den positiv bewerteten Varianten dieser Studien. Eine systematische Untersuchung des Zusammenspiels dieser Parameter und deren Auswirkungen auf die Strömung steht jedoch aus. Darüber hinaus existieren auch bei der Übertragung des Stands der Technik auf die Verhältnisse an Bundeswasserstraßen Unsicherheiten.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Das seit dem 1. März 2010 geltende Gesetz zur Neuregelung des Wasserrechts (WHG) verpflichtet die WSV zur Erhaltung oder Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit an den Staustufen, die von ihr errichtet oder betrieben werden, soweit dies für die Erreichung der Ziele der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie erforderlich ist. Da die überwiegende Anzahl der WSV-Staustufen über keine ausreichend funktionsfähigen Anlagen verfügen, die die Fischwanderung und damit die Durchwanderbarkeit der Bundeswasserstraßen gewährleisten, wird an einer Vielzahl der Staustufen der Bau von Fischwechsellanlagen bzw. deren Ertüchtigung erforderlich. Es besteht demnach in der WSV ein großer Bedarf, die vorhandenen Erfahrungen bei Fischaufstiegsanlagen für die Verhältnisse an Bundeswasserstraßen zu prüfen und weiterzuentwickeln.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel des FuE-Projektes ist allgemeingültige, objektunabhängige Gesetzmäßigkeiten als quantitative Handreichung zur Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen an Bundeswasserstraßen zu erarbeiten. Das vorliegende FuE-Projekt beschäftigt sich mit dem Themenfeld der Passierbarkeit, d. h. mit den Verhältnissen innerhalb der eigentlichen Fischaufstiegsanlage. In dem hier beschriebenen FuE-Projekt liegt der Fokus auf dem sogenannten Schlitzpass, da dieser der am häufigsten eingesetzte Bautyp ist.

Im Rahmen des FuE-Projektes sollen die zugelassenen geometrischen Parameterintervalle vom Merkblatt DWA-M 509 systematisch untersucht werden, um derer Auswirkungen auf die Strömungseigenschaften in Schlitzpässen aufzuzeigen, insbesondere die Auswirkungen auf die Geschwindigkeitsverteilung und Turbulenz innerhalb der Becken.

Die Untersuchungsergebnisse müssen später in fischbiologischer Hinsicht bewertet werden, um belastbare Bemessungsvorgaben abzuleiten. Dies ist derzeit wegen fehlender Ergebnisse aus Schwimmverhaltensuntersuchungen von Fischen sehr begrenzt möglich, da der Einfluss unterschiedlicher

Strömungseigenschaften auf das Schwimmverhalten verschiedener Fischarten derzeit nur begrenzt zur Verfügung steht.

## 2 Untersuchungsmethoden

Die Auswirkung der Geometrie auf die Strömungseigenschaften wird mittels physikalischer Modelluntersuchungen ermittelt, in dem die relevanten Geometrievarianten eingebaut und untersucht werden. Da sowohl die entstehende Anzahl der Varianten als auch der zeitliche Aufwand der Messung einzelner Varianten groß sind, werden unterschiedliche Aspekte in unterschiedlichen physikalischen Modellen, mittels unterschiedlicher Messverfahren in Kooperation mit dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des KIT (IWG) in zwei Teilprojekten parallel untersucht. Die Auswirkungen auf die Turbulenz werden im Teilprojekt 1 in Laborräumen der BAW durchgeführt, die Auswirkungen auf die Geschwindigkeitsverteilung werden im Teilprojekt 2 in Laborräumen des IWG durchgeführt.

### 2.1 Teilprojekt 1: Untersuchungen zu Turbulenz

Die Auswirkung der Beckengeometrie auf die Eigenschaften der Turbulenz (z. B. Skalen) werden in einem physikalischen Modell eines Schlitzpasses mit neun aufeinander folgenden Becken ermittelt. Die Sohlneigung des Modells ist auf 2,8 % fixiert, die Beckendimensionen sind 78,5 x 99,0 cm. Die Schlitzpasseinbauten sind flexibel anpassbar. Das Modell entspricht einem Maßstab von ca. 1:4 in Bezug auf die Verhältnisse der geplanten Fischaufstiegsanlagen am Neckar. Für Fließgeschwindigkeitsmessungen kommen die hochauflösenden Messverfahren PIV (Particle Image Velocimetry) und ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) zur Anwendung, die Wasserspiegellagen werden in jeweils einem Punkt oberhalb und unterhalb jeder Trennwand mit fest montierten akustischen Messsonden erfasst.

Um die Auswirkung des Sohlensubstrates auf die Hydraulik zu prüfen, kann der Boden des Fischpasses optional mit Halbkugeln von 50 mm Durchmesser bedeckt werden. Die PIV-Messungen müssen aus messtechnischen Gründen jedoch ohne Sohlsubstrat durchgeführt werden.

### 2.2 Teilprojekt 2: Untersuchung der Geschwindigkeitsverteilung

Die Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung werden an einem physikalischen Modell eines Schlitzpasses mit 6 aufeinander folgenden Becken am IWG durchgeführt. Die Schlitzpasseinbauten sind als modulare Elemente installiert, um eine große Variabilität in Bezug auf die geometrischen Abmessungen der Becken und Schlitze zu ermöglichen. Die Sohlneigung des Modells ist variabel einstellbar.

Die Untersuchungen sind in 2 Untersuchungsbausteine (UB) aufgeteilt. Im Rahmen von UB1 wird die Strömungssignatur in den Becken mittels Langzeitbelichtung aufgenommen und parallel die Wasserspiegellagen und der Durchfluss aufgezeichnet. In UB2 erfolgt dann die Messung der Geschwindigkeiten mittels ADV.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Teilprojekt 1

Die Abflusskapazität des Schlitzpasses wurde anhand von Durchfluss- und Wasserspiegellagenmessungen bestimmt und das Resultat belegt den in der Literatur beschriebenen linearen Zusammenhang zwischen Durchfluss  $Q$  und mittlerer Wassertiefe  $h_m$  in den Becken von Schlitzpässen. Für die Abflusskapazität wurde im Weiteren die Anwendung einer linearen Formel aus Wang et al. (2010) geprüft, wo mit der Schlitzweite  $s$  und der Wasserspiegeldifferenz zwischen aufeinanderfolgenden Becken  $\Delta h$  weitere Parameter betrachtet wurden. Beckengeometriespezifische Einflüsse auf die Abflusskapazität werden darin in einem Durchflussbeiwert  $C_{md}$  zusammengefasst:

$$Q=C_{md}\cdot h_m\cdot s\cdot\sqrt{2\cdot g\cdot\Delta h} \quad (1)$$

Die Auswirkung des Sohlensubstrates auf die Abflusskapazität ist lediglich in dem Versatz der mittleren Wassertiefen zu sehen, der Zusammenhang (1) zeigt die gleiche Linearitätsbeziehung mit und ohne Sohlsubstrat.

Tiefenaufgelöste Fließgeschwindigkeitsmessungen mittels ADV zeigten, dass es innerhalb eines Beckens keine signifikante Tiefenabhängigkeit der Fließgeschwindigkeiten und Strömungsmuster gibt, was ebenfalls durch Literatur belegt ist. Diese Feststellung gilt auch für die Versuche mit Sohlensubstrat. Auch wurden zwischen den Geschwindigkeitsfeldern mit und ohne Sohlensubstrat keine signifikanten Unterschiede entdeckt. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass lediglich die Strömung in einer relativ dünnen Schicht an der Sohle vom Sohlensubstrat beeinflusst wird, und das übrige Strömungsbild durch die Beckengeometrie geprägt wird.

### 3.2 Teilprojekt 2

Das Modell und die Modellsteuerung am KIT wurden im Laufe des Jahres weiter optimiert. Es wurden 10 Ultraschall-Sonden im Modell eingebaut, um eine kontinuierliche Erfassung des Wasserstandes an den Riegeln zwischen den Becken zu ermöglichen. Eine zusätzliche Ultraschall-Sonde wurde in die automatische Traversierung integriert, um die Wasserspiegellagen eines kompletten Beckens aufzunehmen (Bild 1).

Im UB1 wurden jeweils 30 Geometrievarianten bei einer Neigung der FAA von 2,8 % und 5 % untersucht. Dazu wurden jeweils das Strömungsbild mittels Langzeitbelichtung aufgenommen und der Abfluss und die Wasserspiegellagen aufgezeichnet.

Erste Ergebnisse zeigen eine Abhängigkeit der Strömungsbilder von der Neigung, dem Breiten-zu-Längen-Verhältnis der Becken und dem Schlitzwinkel.

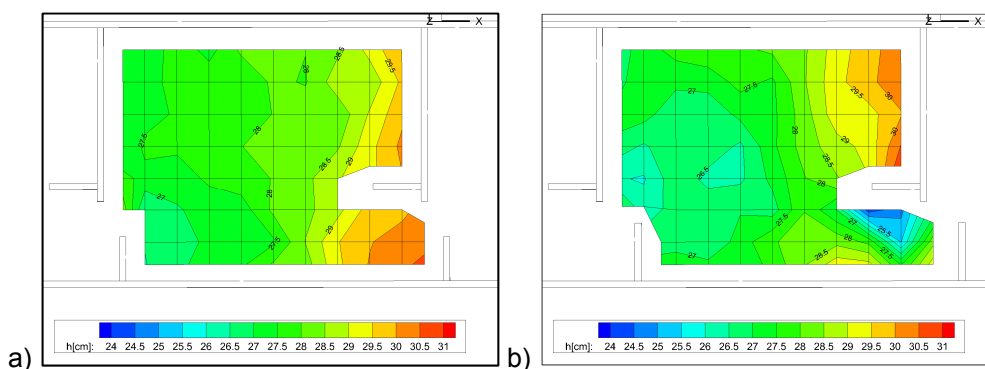


Bild 1: Wasserspiegellagen zweier Varianten mit (a)  $S = 2,8 \%$ ,  $B/L = 0,8$ ,  $\alpha = 24^\circ$  und (b)  $S = 2,8 \%$ ,  $B/L = 0,8$ ,  $\alpha = 56^\circ$

## 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

### 4.1 Teilprojekt 1

- 2015: – Optimierung und Auswertung der PIV-Daten
- 2016: – Hydraulische Untersuchungen der Varianten in der PIV-Rinne
- Ergebnissynthese und Dokumentation

### 4.2 Teilprojekt 2

- 2015: Auswertung der Ergebnisse aus Untersuchungsbaustein 1
- Hydraulische Untersuchungen verschiedener Varianten mittels ADV
- Optimierung der Auswertung der ADV-Daten
- 2016: – Ergebnissynthese und Ableitung eines hydraulischen Bemessungsverfahrens
- Dokumentation

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2016.

## 5 Literatur

Wang, R.; David, L., Larinier, M. (2010): Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes. In: Knowl. Managt. Aquatic Ecosyst. 396-02



## 6 Veröffentlichungen

- Höger, V.; Musall, M.; Sokoray-Varga, B. (2014): Hydraulik von Fischeufstiegsanlagen in Schlitzpassbauweise – Physikalische und Numerische Untersuchungen zur Optimierung der Passierbarkeit. In: Tagungsband zur Kolloquiumsreihe Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen 9-10. Juli 2014, 4. Kolloquium, Koblenz, Deutschland.
- Höger, V.; Henning, M.; Nestmann, F. (2014): Experimental study on the influence of pool geometry on flow patterns in vertical-slot fishways. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Ecohydraulics, Trondheim, Norwegen.
- Sokoray-Varga B., Weichert R. und Nestmann F. (2014). Erfassung turbulenter Wirbel in Vertical-slot Fischpässen mittels zeitaufgelösten PIV. In: *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 22. Fachtagung 2014*, GALA e.V., Karlsruhe, Deutschland, 42.1 – 42.8

## **Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte und Transportphänomene in morphodynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen**

**Netzplan-Nr.:** A39530170003

**Projektleiter:** Dr.-Ing. T. Wenka, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Numerische Verfahren im Wasserbau (W5)

**E-Mail:** thomas.wenka@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Analyse der bettbildenden Prozesse in alluvialen Fließgewässern bedarf infolge des intensiven Zusammenspiels geometrischer, granulometrischer und strömungsmechanischer Effekte einer hohen Auflösung. Obwohl die mikro- bis mesoskaligen Strömungsprozesse aufgrund der Turbulenz stochastischer Natur sind, sind in der Strömungsmodellierung vorrangig deterministische Methoden im Einsatz, um zumindest die integralen Prozesse anhand mittlerer Werte gut abbilden zu können. Dreidimensionale Effekte der Strömung spielen im Nahbereich wasserbaulicher Maßnahmen und in Gerinnekrümmungen eine entscheidende Rolle. Der als Bewegungsbeginn der Sohle bezeichnete Grenzzustand ist bei der numerischen Modellierung der Morphodynamik in Flüssen ein für die Prognose des Sedimenttransports und die daran gekoppelte Morphogenese der Stromsohle maßgeblicher Parameter. Von der Strömungsseite kommend, ist es die transportwirksame Sohlschubspannung, die es in Abhängigkeit des gewählten Verfahrens- bzw. Modellansatzes zu erfassen gilt. Von der Flusssohle kommend, sind es die Oberflächen- bzw. Formrauheiten und die Lagerungseigenschaften, die in Bezug auf den Bewegungsbeginn eine entscheidende Rolle spielen. Die Untersuchung des Potentials der dreidimensionalen Strömungsmodellierung, morphologische Prozesse besser als 2D-tiefengemittelte Ansätze beschreiben zu können, steht im Vordergrund der Untersuchungen. Die Implementierung und Anwendung von Schubspannungsansätzen, die zusätzlich die vertikale Geschwindigkeitskomponente berücksichtigen, spielt dabei eine wesentliche Rolle.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

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

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Als Ziel der Untersuchungen sollen dreidimensionale Strömungseffekte und die damit verknüpften Transportphänomene in den numerischen 2D- und 3D-Modellen, die auf der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung beruhen, adäquat erfasst werden. Ferner sollen die bisher in den numerischen Verfahren verwendeten Ansätze für den Bewegungsbeginn anhand von aktuellen Methoden, die ggfs. auf deterministischen, stochastischen oder gemischten Ansätzen beruhen, verfeinert werden. Durch deren Implementierung in die numerischen Modelle der BAW sollen die Planung von Bau- und Erhaltungsmaßnahmen und die Vorhersage von morphodynamischen Entwicklungstendenzen in Bundeswasserstraßen künftig zuverlässiger und genauer werden (BAW 2010).

### **2 Untersuchungsmethoden**

Da die Untersuchungen primär der Weiterentwicklung der numerischen Methoden der BAW im Bereich des Flussbaus dienen sollen, steht das TELEMAC-SISYPHE-Programmsystem im Vordergrund. Zur Validierung werden unterschiedliche Einflussfaktoren auf die Feststofftransportmodellierung betrachtet. Hierbei werden zwei- und dreidimensionale Berechnungen für Laborgerinne sowie natürliche Gewäs-

serabschnitte durchgeführt, um die für die Geschiebetransportmodellierung maßgebenden Prozesse an den Bundeswasserstraßen zu identifizieren. Ziel der Untersuchungen ist es, belastbare Aussagen aus der numerischen Modellierung zu erhalten und daraus eine Bewertung der numerischen 2D- und 3D-Verfahren bzgl. der hydraulischen und morphologischen Ergebnisse ableiten zu können.

### 3 Ergebnisse

Vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Dimensionalität der Strömungsmodellierung und deren Einfluss auf die Abbildung der hydraulischen und morphologischen Prozesse, sollten im Rahmen der Untersuchungen folgende Schwerpunktthemen betrachtet werden:

- Modellierung und bedarfsweise Anpassung bzw. Erweiterung des Sekundärströmungseinflusses auf das Geschwindigkeitsfeld in 2D-tiefengemittelten Verfahren mittels Anwendung und Validierung des durch die EDF neu in TELEMAC-2D implementierten Dispersionsansatzes (Tassi und Wang, 2014). Durchführung vergleichender 2D- und 3D-Simulationen und Bewertung des Dispersionsansatzes bezüglich der hydraulischen und morphologischen Ergebnisse.
- Analyse und Bewertung der im Rahmen des Modellvergleichs von TELEMAC/SISYPHE und FAST3D (TUM, 2014) festgestellten Unterschiede in den hydraulischen und morphologischen Ergebnissen des Niederrheinmodells bei Düsseldorf (mäandrierender Rheinabschnitt).

Bei der Sekundärströmung ist zu beobachten, dass diese erst allmählich im Laufe der Flusskrümmung entsteht und deren Zerfall sich auf einen Nachlaufbereich unterstrom der eigentlichen Krümmung erstreckt. Wird in Anlehnung an den in SISYPHE enthaltenen „loading-Law“-Ansatz für das Geschiebetransportvermögen der maßgebende Krümmungsradius angepasst (Phillips und Sutherland, 1989), kann dieser Effekt z. B. anhand der Entwicklungslänge nach Kalkwijk und Booij (1986) im numerischen Modell nachvollzogen werden. In der Validierung des Ansatzes zeigten sich jedoch insbesondere bei der Modellierung von Naturstrecken keine signifikanten Verbesserungen hinsichtlich der Transportsimulation im An- und Nachlaufbereich der Gerinnekrümmungen. Neben der Korrektur der Transportrichtung in Folge des Sekundärströmungseinflusses wurde eine alternative Implementierung zur Berücksichtigung des Sekundärströmungseinflusses allein auf die Strömungscharakteristik in Gerinnekrümmungen nach Tassi und Wang (2014) analysiert. Mit Hilfe eines so genannten Dispersionsansatzes wird hierbei in tiefengemittelten Modellen der Einfluss der Sekundärströmung auf die Fließgeschwindigkeiten und deren Verteilung mittels zusätzlicher Dispersionsterme erfasst. In natürlichen Flussstrecken führte die Berücksichtigung der Dispersionsansätze jedoch zu keiner signifikanten Veränderung der Strömungs- und Transportcharakteristik (Bild 1). Vermutlich überprägt die Strömungssituation in Gerinnekrümmungen mit bereits ausgebildetem Sohlprofil die Dispersionsterme im 2D-Modell zu sehr. In Anlehnung an Backhaus et al. (2014) sollten daher ihrem Entwicklungsstand entsprechend die neuen Modellansätze anhand von 3D-Testrechnungen überprüft bzw. auf die Streckenspezifika eingestellt werden.

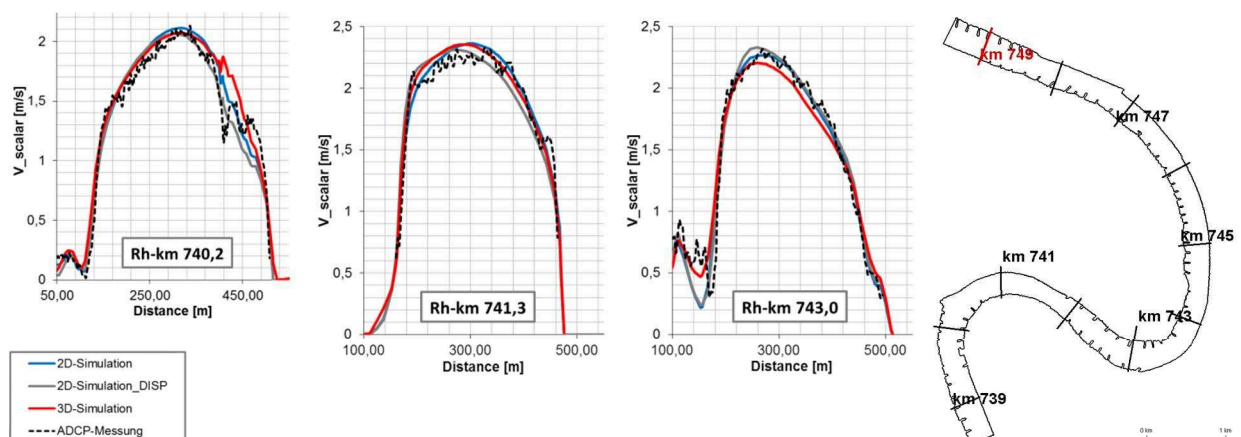


Bild 1: Querprofile tiefengemittelter Fließgeschwindigkeiten ADCP, 3D, 2D mit/ohne Dispersionsansatz

Der Modellvergleich zwischen TELEMAC/SISYPHE und FAST3D anhand der Rheinstrecke „Neuss-Düsseldorf“ (Rhein-km 739,0 – 749,0) zeigte in den Strömungsgrößen generell eine gute Übereinstimmung zwischen beiden Verfahren (TUM, 2014). Lediglich die Sohlschubspannungen lagen bei FAST3D generell um ca. 20 – 30% höher, was u. a. auf leicht unterschiedliche Interpretationen des Widerstandsgesetzes nach *Nikuradse* zurückzuführen ist, jedoch noch nicht abschließend geklärt werden konnte. Die Ergebnisse zu den morphologischen Vergleichsrechnungen, die in einer ersten Betrachtung teilweise wesentliche Differenzen aufwiesen, wurden einer weiteren Überprüfung unterzogen. Dabei wurde festgestellt, dass die Anfangsbedingungen für die Kornverteilungen in der Sohle im FAST-Modell als konstant angenommen wurden, im TELEMAC-Modell jedoch aufgrund einer morphologischen Initialisierung variabel vorlagen. Da diese Anfangsbedingungen im FAST-Modell nicht entsprechend gesetzt waren und seitens TUM keine neuen Berechnungen durchgeführt wurden, ist eine belastbare Aussage zum morphologischen Vergleich zwischen beiden Verfahren derzeit nicht möglich.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die wesentlichen Erkenntnisse werden im FuE-Abschlussbericht (BAW, 2015) sowie im 3. Zwischenbericht (IWG, 2013) und Endbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung des KIT (IWG, 2014) zusammengestellt. Da sich die Untersuchungen weitestgehend auf deterministische Methoden beschränkten, werden in einem darauf aufbauenden neuen FuE-Projekt primär stochastische Methoden betrachtet und aktuelle Ansätze wie z. B. der von Tsai und Lai (2014) hinsichtlich ihrer Eignung für Problemstellungen an Bundeswasserstraßen getestet.

Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 2015.

#### 5 Literatur

- BAW (2010): Fachkonzept der Projektgruppe Mehrdimensionale Feststofftransportmodellierung, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Version 1.0.
- BAW (2015): Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte und Transportphänomene in morphodynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen. Abschlussbericht zum FuE-Projekt A395301700030, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat W5, (in Vorbereitung).
- IWG (2013): 3. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung, SSIIIM Verfahrenvergleich. KIT, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, März 2013.
- IWG (2014): 4. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung, Endbericht. KIT, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Dezember 2014.
- Kalkwijk, J.P.T., R. Booij (1986): Adaptation of secondary flow in a nearly-horizontal flow, IAHR, Journ. Hydr. Res., Vol. 24, No.1, pp. 19-37, 1986.
- Phillips, B.C., Sutherland, A.J. (1989): Spatial lag effects in bed load sediment transport. IAHR, Journ. Hydr. Res., Vol. 27, No.1, pp. 115-133, 1989.
- Tassi, P., Wang, D. (2014): Secondary Flow Corrections into the TELEMAC-MASCARET Modelling System, Proc. of 21<sup>st</sup> TELEMAC-MASCARET User Club, Grenoble, France, 15-17 October, 2014.
- Tsai, C.W., Lai, K.-C. (2014): Three-State Continuous-Time Markov Chain Model for Mixed-Size Sediment Particle Transport. ASCE Journ Hydr. Eng., publ. online 2014-06-23.
- TUM (2014): Validierung dreidimensionaler Feststofftransportmodelle für Fragestellungen an den Bundeswasserstraßen. Bericht, Institut für Wasser und Umwelt, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München, Juli 2014.

#### 6 Veröffentlichungen

- Backhaus, L., Brudy-Zippelius, T., Wenka, T., Riesterer, J. (2014): Comparison of Morphological Predictions in the Lower Rhine River by Means of a 2-D and 3-D Model and in situ Measurements. Proc. River Flow 2014, International Conference on Fluvial Hydraulics, 3. – 5. Sept., Lausanne.
- Backhaus, L., Riesterer, J. (2014): Einsatz morphodynamisch-numerischer Methoden am Beispiel eines Niederrheinmäanders. Konferenzband zum Kolloquium „Herausforderung Sedimenttransport – Methoden und Konzepte im Flussbau“, Bundesanstalt für Wasserbau, 26. November 2014, Karlsruhe.

- Riesterer, J., Wenka, T., Oberle, P., Brudy-Zippelius, T. (2014): Numerische Modellierung des Geschiebetransports in gekrümmten Gerinnen. Proc. 37. Dresdner Wasserbaukolloquium, 13./14.3.14, Dresden.
- Riesterer, J., Brudy-Zippelius, T., Wenka, T., Nestmann, F. (2015): Multidimensional Bed Load Transport Modelling of a Secondary Flow influenced Curved Channel. Zur Veröffentlichung eingereicht bei: IAHR, Journal of Applied Water Engineering and Research.
- Wenka, T., Schmidt, A., Brudy-Zippelius, T. (2015): Consideration of three-dimensional flow and transport phenomena in morphological models of inland waterways. To be published in Proceedings of 36<sup>th</sup> IAHR World Congress, Delft, 28.06 – 03.07 2015, The Hague.
- Schmidt, A., Backhaus, L., Heinzelmann, C. (2014): Methoden zur Simulation morphodynamischer Prozesse in Binnenwasserstraßen. KW - Korrespondenz Wasserwirtschaft, Nr. 8, August 2014, GFA Verl.

## **Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen**

**Netzplan-Nr.:** A39530170004

**Projektleiter:** Dipl.- Ing. W. Kampke, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Wasserstraße und Umwelt (W1)

**E-Mail:** wolfgang.kampke@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

Zur Gewährleistung der ökologischen Durchgängigkeit unserer Fließgewässer sind funktionstüchtige Fischaufstiegsanlagen (FAA) an Stauanlagen unabdingbare Bausteine. Die Funktionsfähigkeit dieser FAA hängt in erster Linie von zwei Faktoren ab, der Auffindbarkeit und der Passierbarkeit. Das Thema der Auffindbarkeit einer Fischaufstiegsanlage beinhaltet die Fragestellung, ob wanderwillige Fische, die direkt bis in das Unterwasser einer Staustufe gelangen, in der Lage sind, den Einstieg in die FAA ohne größere Verzögerungen zu finden. Die besondere Herausforderung an Bundeswasserstraßen ist, dass die mit der Strömung aus der Fischaufstiegsanlage konkurrierende Strömung im Auslaufbereich des Kraftwerks bzw. des Wehrs so dominant ist, dass eine für den Fisch wahrnehmbare Leitströmung schwierig zu realisieren ist. Ziel des Forschungsvorhabens ist es, für die Verhältnisse an Bundeswasserstraßen Bemessungskriterien abzuleiten, die die kleinräumige Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen und die Erzeugung einer für den Fisch wahrnehmbaren Leitströmung verbessern und die es dem planenden Ingenieur erlauben, den Einstieg der FAA und dessen Beaufschlagung zuverlässig zu gestalten und zu dimensionieren.

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Schwerpunkte der bisher durchgeführten Forschungsarbeiten zur Auffindbarkeit von FAA sowie der aktuelle Stand des Wissens, der im Wesentlichen in DWA-M 509 (DWA 2014), im Handbuch Querbauwerke (Dumont et al. 2005) und in einigen internationalen Publikationen dokumentiert ist, sind bislang nur unzureichend auf die Randbedingungen an größeren Fließgewässern bezogen.

Wesentlich für eine Weiterentwicklung der Bemessungsstandards ist eine verbesserte Kenntnis über das artspezifische Wanderverhalten von Fischen. Da die Untersuchung dieser Fragestellung mit lebenden Fischen mit großem Aufwand verbunden ist, wird in einem ersten Schritt die hydraulische Optimierung der Strömungssituation im Unterwasser von Wehr- und Wasserkraftanlagen angestrebt.

Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die Untersuchung der Einflüsse von unterschiedlichen Turbinencharakteristika und Betriebsmodi auf die Strömungsverhältnisse und somit auf die Konkurrenzsituation zur Fischpass-Leitströmung.

Weiterer Forschungsbedarf besteht im Hinblick auf die Möglichkeit durch ein großräumigeres Turbinen- und Wehrsteuerungsmanagement die hydraulischen Randbedingungen im Nahfeld der Fischaufstiegsanlage und somit die Auffindbarkeit zu verbessern.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Im Zuge der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie und der Änderung des Wasserhaushaltsgesetzes fällt die Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit und insbesondere des Fischaufstieges in den gesetzlichen Auftrag der WSV. Im Hinblick auf die Dringlichkeit der Maßnahmen und der großen Zahl von ca. 250 durchgängig zu gestaltenden Stauanlagen, besteht ein großes Bedürfnis nach neuen Erkenntnissen und daraus abgeleiteten Bemessungskriterien für FAA an Bundeswasserstraßen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel der Untersuchung ist es, Kriterien abzuleiten, die es dem planenden Ingenieur erlauben, den Einstieg der Fischaufstiegsanlage und dessen Beaufschlagung für die Verhältnisse an den Bundeswasserstraßen zuverlässig zu gestalten und zu dimensionieren, sodass eine für den Fisch wahrnehmbare Leitströmung erzeugt wird (AP 1). Des Weiteren sollen die Auswirkungen von Wasserkraft-

anlagen auf die Strömungsverhältnisse im Unterwasser von Stauanlagen identifiziert werden, um zum einen die Auffindbarkeit der Fischaufstiegsanlagen zu verbessern und zum anderen die bestehenden numerischen Modellierungen weiterzuentwickeln (AP 2). Darüber hinaus sollen die Aus- und Wechselwirkung von Kraftwerks-, Wehr- und Schleusensteuerungen auf die hydraulischen Randbedingungen an Stauanlagen untersucht und Steuerungskonzepte zur Optimierung der Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen entwickelt werden (AP 3).

## 2 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungsmethoden orientieren sich an den jeweiligen Fragestellungen innerhalb der einzelnen Arbeitspakete. Mittels physikalischen Modelluntersuchungen werden der Einfluss von baulichen Veränderungen auf die hydraulischen Randbedingungen im Nahfeld von FAA (AP 1), die Beschreibung des Strömungsfeldes im Unterwasser einer Stauanlage für verschiedene Kraftwerksausgestaltungen (AP 2), sowie die Aus- und Wechselwirkungen von Kraftwerks-, Wehr und Schleusensteuerungen auf die hydraulischen Randbedingungen an Stauanlagen analysiert (AP 3). Numerische Modelluntersuchungen werden zur Betrachtung des Unterwasserbereichs der Stauanlagen bzw. des Kraftwerkes durchgeführt (AP 1, 2 und 3). Ebenfalls im Rahmen aller Arbeitspakete werden Naturmessungen mit ADV bzw. ADCP an den Pilotstandorten durchgeführt. Ergänzend kommen zur Betrachtung unterschiedlicher Einstiegsgehaltungen von FAA ethohydraulische Untersuchungen zum Einsatz.

## 3 Ergebnisse

Im Rahmen eines internationalen Workshops von BAW und BfG zur Planung und Bewertung der Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen wurden die Ansätze von BAW und BfG zur Beurteilung des Wanderkorridors, zur Leitströmung und zur Auffindbarkeit vorgestellt und intensiv diskutiert. Mit dem Feedback der internationalen Experten können die als zielführend erachteten Bewertungsansätze weiter detailliert und verbessert werden.

Im Rahmen einer Untersuchungsreihe zur Einstiegsanordnung von FAA (AP 1) im Hinblick auf die Auffindbarkeit wurde eine typische Variante mit zwei getrennten Einstiegen durch Studien in einem physikalischen Modell beurteilt. Erste Messungen zeigten, dass bei diesem Bautyp die Auffindbarkeit am abgerückten Einstieg in Ufernähe gegeben ist (vgl. Bild 1). Inwieweit die Unterbrechung des Wanderkorridors bzw. die Ausbildung einer Sackgasse durch den strömungsberuhigten Bereich am Ende des Saugschlauches Auswirkung auf das Fischverhalten hat muss durch biologische Untersuchungen beurteilt werden.

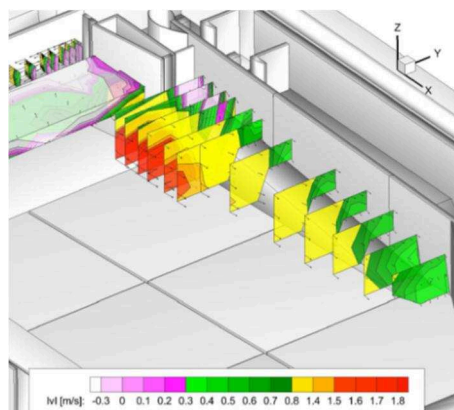
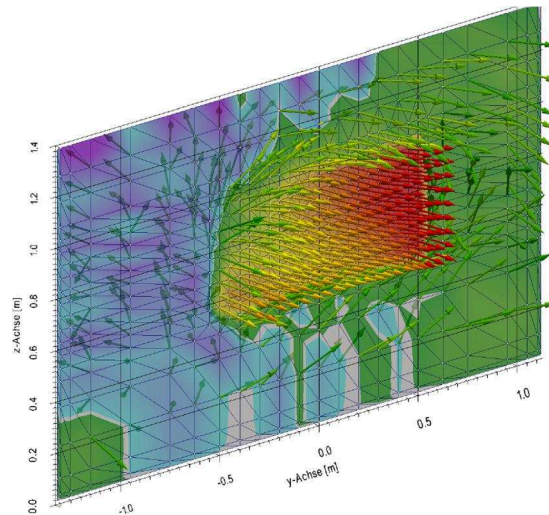


Bild1: *Ausbildung der Leitströmung im UW der Stauanlage im physikalischen Modell bei Q330*

Im Zusammenhang mit AP 1 wurden Betrachtungen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von Dotationspumpe und Dotierturbine für die FAA an der Stauanlage Kochendorf/Neckar durchgeführt. Die Betrachtungen ergaben, dass unter den Randbedingungen des Standortes die Dotierturbine im Vergleich zur Dotationspumpe die deutlich wirtschaftlichere Lösung bietet, wobei die Amortisationszeit der Dotierturbine noch durch Optimierung der Abflussmengen minimiert werden kann.

Im Rahmen des AP 2 wurde eine Datenbank mit charakteristischen Kenngrößen von Wasserkraftwerken und Stauanlagen an Bundeswasserstraßen erstellt. Anhand der erhobenen Daten konnten typische Betriebspunkte identifiziert werden und am Turbinenversuchsstand der TU München untersucht werden. Bild 2 zeigt die Strömungsverhältnisse einer herkömmlichen Niederdruck Kaplan-Turbine unter Teillast am Austrittsquerschnitt des Saugschlauches im UW der Wasserkraftanlage. In folgenden Untersuchungen sollen weitere charakteristische Parameter- und Turbinenkonstellationen und deren Auswirkungen auf die Strömungsverhältnisse im Unterwasser untersucht werden.



*Bild 2: Strömungsverhältnisse einer Niederdruck-Kaplan Turbine unter Teillast am Austrittsquerschnitt des Saugschlauches im UW. Quelle: TU München*

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2015: Untersuchung verschiedener Arten der Einstiegsgestaltung in FAA im physikalischen Modell (AP 1)
  - Naturmessungen an Pilotstandorten (AP 1, 2 und 3)
  - Aufbau und Weiterentwicklung numerischer 3D Modelle aller Pilotstandorte (AP 1, 2 und 3)
  - Untersuchungen am Turbinenversuchsstand an der TU München (AP 2)
  - Weiterentwicklung numerisches 3D Modell durch Implementierung der Turbinencharakteristika (AP 2)
- 2016: Untersuchung verschiedener Arten der Einstiegsgestaltung in FAA im physikalischen Modell (AP 1)
  - Ethohydraulische Untersuchungen für verschiedene Einstiegsgestaltungen (AP 1)
  - Naturmessungen an Pilotstandorten (AP 1, 2 und 3)
  - Weiterentwicklung numerisches 3D Modell durch Implementierung Turbinencharakteristika (AP 2)
  - Entwicklung von Steuerungskonzepten zur Optimierung der Auffindbarkeit von FAA (AP 3)

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2016.

#### 5 Literatur

Dumont, U., P. Anderer & U. Schwevers (2005): Handbuch Querbauwerke. Düsseldorf (Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und ländlichen Raum NRW), 212 S.  
 DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (2014): Merkblatt DWA-M 509 Fischaufstiegsanlagen und Fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. -Hennef, 334 S



## 6 Veröffentlichungen

- Kampke, W.; Pitsch, M.(2014): Attraction of fishways: Requirements, applied approach and open questions in the planning process. Internationaler Workshop von BAW/BfG: "Planning and evaluating the attraction of fishways" 23.-24. Januar 2014, Koblenz.
- Kampke, W.; Weichert, R.; Scholten, M. (2014): How to guide fish into a fishway? Strategic aspects and investigations on attraction flow. 10th International Symposium on Ecohydraulics 2014 (ISE), Trondheim, NORWAY, 23-27 JUNE, 2014
- Ojus, A. (2014): Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Dotationsturbine und Dotationspumpe für die Fischaufstiegsanlage an der Stauanlage Kochendorf/Neckar. Bachelorarbeit am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

## **Untersuchungen zur Herstellung bzw. Verbesserung der Sedimentdurchgängigkeit an der Staustufe Iffezheim**

**Netzplan-Nr.:** A39530170005

**Projektleiterin:** Dr.-Ing. A. Wahrheit-Lensing, Dipl.-Phys. C. Seegers, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat Flussbau (W2)

**E-Mail:** andrea.wahrheit-lensing@baw.de, christina.seeger@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die erhebliche Verminderung der Strömungsgeschwindigkeiten oberhalb und im Nahbereich von Staustufen führt häufig zu regelmäßig wiederkehrenden Sedimentanlandungen, die unterschiedliche negative Auswirkungen auf den Betrieb und die Sicherheit der Stauhaltung haben können. Aus diesem Grund werden diese Anlandungen regelmäßig durch Baggerungen entfernt. Im Bereich der Staustufe Iffezheim sind die gebaggerten Sedimente zudem durch HCB belastet, so dass das Baggergut als Schadstoff behandelt und deponiert werden muss, was zu einer enormen Kostensteigerung führt. Die hydrodynamischen und sedimentologischen Prozesse, die die Anlandung in Stauhaltungen nach Ort und Menge beeinflussen, sind nicht hinreichend bekannt und untersucht. Daher besteht ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf insbesondere bei der Weiterentwicklung und Validierung numerischer Berechnungsverfahren, um Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Transport, der Sedimentation und Erosion von Sedimenten in Stauhaltungen zu modellieren und hinsichtlich ihrer schädlichen Auswirkungen zu minimieren.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Das WSA Freiburg hat in einem Sachstandsbericht die Problematik der Sedimentation im Wehrkanal Iffezheim und die damit zusammenhängenden Maßnahmetätigkeiten seit der Inbetriebnahme der Staustufe Iffezheim zusammengestellt (WSV 2011). Aufgrund der seit 2005 ausgeschöpften Unterbringungsmöglichkeiten im Bereich der Staustufe und der nicht möglichen Verspülbarkeit des Baggergutes, ist das WSA Freiburg gezwungen neue Maßnahmen zur Verminderung der regelmäßig anfallenden Baggermengen und Möglichkeiten zur kostengünstigen Unterbringung des Baggerguts zu suchen. Deshalb sind in o. g. Sachstandsbericht Optimierungsmöglichkeiten, die kurz-, mittel- und langfristige Lösungswege aufzeigen, dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Problematik im Wehrkanal Iffezheim nicht mit einem allumfassenden einmaligen Eingriff gelöst werden kann. Es sind daher mehrere Ansätze zu prüfen und zu präzisieren, die langfristig zu einer wirtschaftlichen Gesamtlösung der Problematik im Wehrkanal Iffezheim führen könnten.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel ist es, Handlungsanweisungen für das Sedimentmanagement unter Berücksichtigung verschiedener hydrologischer und baulicher Situationen zu erarbeiten. Dazu wurde in der BAW bereits in den Jahren 2006 bis 2008 ein TELEMACH-3D-Modell vom Nahbereich der Staustufe Iffezheim aufgebaut und zur Durchführung von ersten hydrodynamischen und morphologischen Berechnungen getestet (BAW 2007, Brudy-Zippelius, 2007). Die Weiterentwicklung des 3D-Modells der Staustufe Iffezheim ist notwendig und zielt auf eine möglichst realistische Nachbildung derjenigen Prozesse, die zu den Anlandungen im Wehrkanal von rd. 150.000 m<sup>3</sup>/a führen. Die Modellrechnungen sollen auf Berechnungsgittern mit unterschiedlichen Auflösungen durchgeführt werden, um die relevanten Prozesse auf unterschiedlichen Skalen zu analysieren.

### **2 Untersuchungsmethoden**

#### **3D-hydrodynamisch-numerisches Modell der Staustufe Iffezheim**

a) Mit einem sehr hoch aufgelösten **Modell A** wird eine Large-Eddy Simulation (LES) möglich, die ein weites Turbulenzspektrum abdeckt. Mit diesem Modell A soll das Prozess- und Systemverständnis zu den Anlandungen im (Teilgebiet) Wehrkanal verbessert werden. Der Simulationszeitraum wird sich

dabei, aufgrund der resultierenden hohen Berechnungsdauer auf einige Stunden oder Tage erstrecken.

b) Mit einem **Modell B** von geringerer Auflösung wird ebenfalls eine LES durchgeführt, die dann nur noch die größten turbulenten Strukturen abbildet. Das Modell B soll einen Simulationszeitraum von rd. 3 Monaten abdecken, der etwa dem mittleren Zeitraum zwischen zwei Peilungen entspricht und damit eine konkrete Möglichkeit zur Modellkalibrierung und -validierung bietet.

c) Mit einem **Modell C** von noch geringerer Auflösung soll ein Simulationszeitraum von mehreren Jahren betrachtet werden, um die langfristigen hydrologischen Einflüsse zu berücksichtigen.

Die unterschiedlichen Modelle A, B und C sind hinsichtlich ihrer Aussagekraft aufeinander abzustimmen. Verschiedene Methoden der Laufzeitbeschleunigung sollen an den Modellen evaluiert werden. An die Weiterentwicklung bzw. Adaption des 3D-Modells ergeben sich somit folgende Anforderungen hinsichtlich Modellauflösung und Abbildung der relevanten Strömungs- und Sedimentationsprozesse:

Modellauflösung. Aufgrund der seit 2006 gestiegenen Rechnerleistung kann die Modellauflösung gegenüber dem vorhandenen 3D-Modell deutlich erhöht werden. Dies betrifft vor allem die Modelle A und B.

Vertikale Impulsbilanzierung. Das Absetzverhalten der sehr feinen Sedimente in der Stauhaltung wird insbesondere durch die vertikale Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst. Aus diesem Grund soll im Gegensatz zu den früheren Untersuchungen auf die vereinfachende Vernachlässigung der vertikalen Impulsbilanz (hydrostatische Druckannahme) verzichtet werden.

Turbulenzmodellierung. Neben den klassischen statistischen Turbulenzmodellen ( $k$ - $\epsilon$ -Modell,  $k$ - $\omega$ -Modell) soll zumindest in den Modellen A und B die Large-Eddy Simulation (LES) zur Turbulenzmodellierung eingesetzt werden. Hierzu ist es im Modell A anzustreben, die das Sedimentationsgeschehen maßgeblich beeinflussenden Wirbelgrößen durch das Strömungsmodell abzubilden.

Sedimenttransportmodellierung. Mit den Weiterentwicklungen am hydrodynamischen Modell soll eine möglichst realitätsnahe Nachbildung der Strömungsprozesse im Bereich der Staustufe erzielt werden. Danach sollen nach Bedarf Weiterentwicklungen am Sedimenttransportmodell vorgenommen werden, die z. B. die Mehrkornmodellierung, das Konsolidierungsmodell, das Flockungsmodell sowie allgemein die Quell- und Senkenterme betreffen. Hierzu sind Veränderungen am Programmcode (Fortran 90/95) in enger Zusammenarbeit mit dem BAW-Referat W5 „Numerische Verfahren im Wasserbau“ vorzunehmen.

### **2D-hydrodynamisch-numerisches Modell der Staustufe Iffezheim**

Untersuchungen, die für die gesamte Stauhaltung durchgeführt werden müssen, z. B. zur Bewertung des Hochwasserschutzniveaus anhand der Einhaltung der Freiborde, werden aufgrund der erforderlichen Modellausdehnung mit einem tiefengemittelten 2D-Modell vorgenommen.

### **Labor- und Naturuntersuchungen**

Nach Bedarf sollen Laboruntersuchungen und Naturmessungen zur Ermittlung von Sedimentparametern durchgeführt werden, die für den Betrieb des 3D-Modells benötigt werden.

## **3 Ergebnisse**

In Kooperation mit der RWTH Aachen wurde im November 2012 damit begonnen das bestehende 3D-TELEMAC-Modell aus dem Jahre 2006 zu reaktivieren. Es wurden sowohl neue Geländedaten eingefügt als auch die 5te Turbine hinzugefügt. Die in 2013 begonnenen Untersuchungen wurden weitergeführt und vertieft.

Ebenso erfolgte eine sukzessive Verbesserung der Kalibrierung des Modells C mit dem Fokus auf eine Optimierung der Übereinstimmung der räumlichen Anlandungsgeometrien zwischen Modell und Natur.

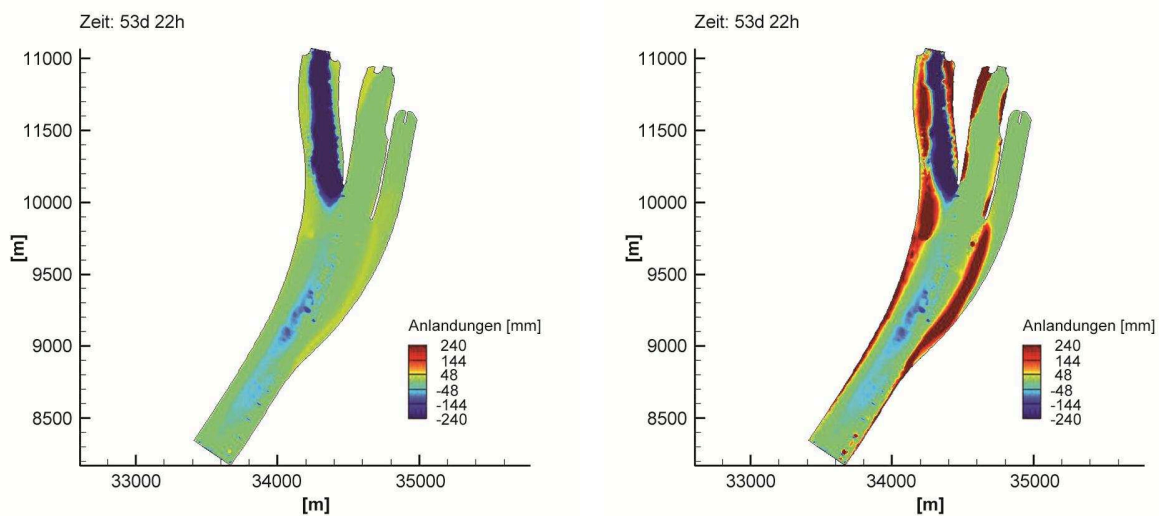
Um die Leistungsfähigkeit des Modells im Hinblick auf unterschiedliche Prozesse und Eigenschaften hin zu testen wurde zudem eine Reihe von Einzelbetrachtungen vorgenommen. Dabei handelt es sich

um Betrachtungen der Sinkgeschwindigkeiten, der skalaren Geschwindigkeiten, des Sedimenteintritts, der Abflussbedingungen und der auftretenden Wirbelstrukturen.

Es zeigte sich, dass die hydrodynamische Simulation die Geschwindigkeiten in der Staustufe zufriedenstellend abbildet. Im Bereich der sedimentbeeinflussenden Prozesse und Randbedingungen bzw. Eingabedaten aus den Naturmessungen jedoch Defizite bestehen.

Im Rahmen von Sensitivitätsbetrachtungen wurden u. a. die Zuflussbedingungen des Sediments, die Zusammensetzung aus unterschiedlichen Korngrößen, die Diffusion des Sediments und die naturnahe Abbildung der Wirbelstrukturen im Wehrkanal untersucht.

Eine genauere Betrachtung der Wirbelstrukturen im Wehrkanal durch höhere Auflösung und möglichst realistische Randbedingungen sowie eine Verbesserung des Sedimentmoduls stehen noch aus.



**Bild 1:** *Simulierte Anlandungen in der Stauhaltung Iffezheim mit dem 3D-Modell, Variation der Sinkgeschwindigkeit im Modell (links geringe Sinkgeschwindigkeit, rechts hohe Sinkgeschwindigkeit)*

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015/2016:

Aufbau und Verbesserung der o. g. unterschiedlichen 3D-hydrodynamisch-numerischen Modelle, wobei die LES von kürzeren Zeiträumen zur Unterstützung der gröber aufgelösten Modelle verwendet wird.

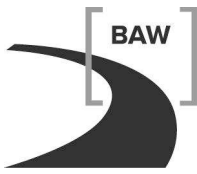
Durchführung von Natur- und Laboruntersuchungen, Anwendung der Modelle auf folgende Fragestellungen

- Bauliche und betriebliche Maßnahmen, Unterhaltungsmaßnahmen
- Anlandungen und morphologisches Gleichgewicht
- Sedimentparameter
- Hochwasserschutzniveau und Freiborde

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2016.

#### 5 Literatur

BAW (2007): Gutachten zu Wasserspiegellagen und Freibord in der Stauhaltung Iffezheim unter Berücksichtigung verschiedener Sohlzustände im oberen Wehrkanal. Gutachten-Auftrags-Nr. A39530110058, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

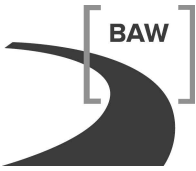


Brudy-Zippelius, T., Zentgraf, R. (2007): Gutachten zu Wasserspiegellagen und Freibord in der Stauhaltung Iffezheim unter Berücksichtigung verschiedener Sohlzustände im oberen Wehrkanal 01.06.2007 (A39530110058).

WSV (2011): Sachstandsbericht „Oberer Wehrkanal Iffezheim, 2011“

## **6 Veröffentlichungen**

-/-



## Hydraulische Wirkung von Stromregelungsbauwerken

**Netzplan-Nr.:** A39530210077

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. B. Hentschel, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Flussbau (W2)

**E-Mail:** bernd.hentschel@baw.de

### 1 Problemstellung und Ziel

#### 1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung werden an den deutschen Wasserstraßen zur Gewährleistung und Verbesserung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt Buhnen und Parallelwerke gebaut und unterhalten. Die Kenntnisse über die genauen Strömungsverhältnisse im Nahbereich dieser Flussregelungsbauwerke mit ihren Auswirkungen auf die Morphologie der Flusssohle und der Buhnenfelder ist unzureichend. Die BAW berät die WSV bei der Planung von Maßnahmen an Regelungsbauwerken und muss deshalb über entsprechendes Wissen verfügen und dieses aufgrund höherer und veränderter Anforderungen ständig erweitern. Die Untersuchungen dienen der Vertiefung der Erkenntnisse zu den komplexen Strömungs- und Feststofftransportvorgängen im Nahbereich von Stromregelungsbauwerken und sollen generell die Prognosefähigkeit verschiedener Modellierungsmethoden verbessern.

#### 1.2 Bedeutung für die WSV

Eine detaillierte Kenntnis des Geschiebetransportes und der Bewegungsmuster von Sohlformen und deren Interaktion mit der Hydraulik ist für unterschiedliche Fragestellungen der WSV von hoher Bedeutung. Dazu gehört auch die Optimierung von Peil- und Unterhaltungsarbeiten an den frei fließenden Bundeswasserstraßen.

Im Rahmen der wasserwirtschaftlichen Unterhaltung an Bundeswasserstraßen ist angedacht, gezielt Stromregelungsbauwerke zu modifizieren. Größere Veränderungen werden dabei voraussichtlich auch Auswirkungen auf den Geschiebetransport im Nahbereich der Bauwerke und in der Fahrrinne haben. Ziel der Untersuchungen ist es, diese Auswirkungen allgemeingültig sowohl hydraulisch als auch morphologisch quantifizieren zu können und für Prognosen zugänglich zu machen.

#### 1.3 Untersuchungsziel

Ziel ist es, systematisch die Auswirkungen von Stromregelungs- und Unterhaltungsvarianten auf den Geschiebetransport und die Sohlformen in alluvialen, frei fließenden Gewässern zu analysieren, um sie mittels numerischer und physikalischer Modellierungen prognostizierbar zu machen. Daneben sollen durch vergleichende Analysen von Naturuntersuchungen die Maßstabsgesetze für die Modellierung von Sedimentbewegungen in physikalischen Modellen weiterentwickelt werden. Derzeit gibt es keine publizierten Ansätze um Sohlformen bei unterschiedlichen Kornverteilungen in physikalischen Modellen über das ganze Abflussspektrum naturähnlich abbilden zu können.

### 2 Untersuchungsmethoden

Im Jahr 2014 wurde in Zusammenarbeit mit der Hochschule Magdeburg / Stendal das Spektrum möglicher Modellierungsphänomene in hydraulischen Modellen durch gezielte Untersuchungen zu unterschiedlichen Ersatzmaterialien als Modellsedimente ausgeweitet, um zum Beispiel die Morphologie im Flussschlauch und im Buhnenfeld in einem einzigen Modell bei unterschiedlichen Abflüssen untersuchen zu können.

Die Auswertungen und Analysen der Naturuntersuchungen an der Elbe an alternativen Buhnenformen (Knickbuhnen und Buhnenkerben sowie Referenzbuhnenfelder bei Schönberg) wurden im Jahr 2014 fortgesetzt. Das begleitende Langzeitmonitoring wird ergänzt durch Messungen zur Veränderlichkeit von Buhnenfeldgeometrien in anderen Abschnitten der Elbe, um die Ergebnisse verallgemeinern zu können (Hentschel 2014). Die Ergebnisse dieses Projektes werden in einer interdisziplinären Publikation gemeinsam mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde und externen Autoren zusammengefasst.

Diese zusammenfassende Schrift ist nahezu fertig gestellt und liegt derzeit bei externen Korrekturlesern. Die Übergabe an einen Verlag ist für das 2. Halbjahr 2015 geplant.

An einer flussbaulichen Laborrinne (30 x 5 m) können systematische Untersuchungen zum Geschiebetransport durchgeführt werden. Die Rinne verfügt dafür über ein hochentwickeltes und weitgehend automatisiertes Messequipment für Wasserspiegel- und Sohlvermessungen. Der Geschiebeein- und -austrag kann zeitabhängig automatisch quantifiziert werden. Die im Jahr 2013 beschaffte Kipp-Rinne (12,5 m x 0,4 m) wurde mess- und steuerungstechnisch im Jahr 2014 ausgerüstet. Aufgrund personeller Engpässe konnten diese Arbeiten erst zum Jahreswechsel 2014/2015 soweit abgeschlossen werden, dass die Rinne für hydraulische und morphologische Grundsatzuntersuchungen genutzt werden kann. An einer weiteren Laborrinne (60 x 2,5 m) wurden Untersuchungen zur Modifikation von Stromregelungsbauwerken fortgesetzt. Diese rein hydraulischen Untersuchungen umfassen das Abflussspektrum von umströmten bis stark überströmten Bauwerken. Die Rinne konnte im Jahr 2014 um eine automatisiert arbeitende Messtraverse erweitert werden, mit der die Positionierung von Messgeräten für die lokale Erfassung von Geschwindigkeiten im Fluidkörper effizient erfolgen kann.

### 3 Ergebnisse

Im Jahr 2014 wurden in der flussbaulichen Systemrinne Untersuchungen zur Wirkung von unterschiedlichen Bühnen-Geometrien (Bühnenkerben, Variation des Bühnenabstandes etc.) auf die Hydraulik und den Geschiebetransport fortgeführt.



*Bild 1: Untersuchung an der flussbaulichen Systemrinne mit beweglicher Sohle, links Untersuchungen an umströmten schematisierten Bühnen und Deckwerken, rechts Untersuchungen an einer fixierten Dünensohle*

Bild 1 zeigt links eine bewegliche Modellsohle aus Sand bei Untersuchungen mit umströmten Bühnen. Rechts in dem Bild ist eine befestigte Sandsohle zu sehen. Die hier vorgenommene Fixierung der Dünen mit einer speziellen Sprühklebetechnik ermöglicht es, die Strömungsverhältnisse über den Dünen zeitlich und räumlich hochaufgelöst im gesamten räumlichen Strömungsfeld zu vermessen. Bei einer beweglichen Sohle würde sich die Geometrie während der Messung ständig verändern. Gleichartige Untersuchungen an einer Sandsohle in einer Bühnenstrecke sind in Vorbereitung. Diese Untersuchungen dienen der Analyse von Dünenformen und Dünengeschwindigkeiten in anthropogen veränderten alluvialen Flüssen.

An den Laborrinnen wurden auch im Jahr 2014 hochwertige Modelldaten für die Weiterentwicklung und Verifikation von numerischen Modellverfahren gewonnen. Diese Daten werden derzeit zusammenfassend analysiert und dokumentiert, um sie langfristig sowohl in der BAW als auch außerhalb für diesen Zweck nutzbar machen zu können.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015:

- Fortführung der Untersuchungen an den flussbaulichen Systemrinnen (Veränderung des Geschiebetransportes infolge Umgestaltung von Stromregelungsbauwerken im Rahmen der wasserwirtschaftlichen Unterhaltung). Wesentliche Schwerpunkte liegen dabei in der Auswirkung geometrischer Modifikationen auf den Geschiebetransport in der Gewässermitte und auf die Austauschvorgänge zwischen den Bühnenfeldern und der Hauptströmung. In einer Kooperation mit der TU Dresden werden diese Untersuchungen an einer beweglichen Sohle und an einer fixierten Dünensohle durchgeführt.
- Die Kooperation mit der Hochschule Magdeburg-Stendal zu künstlichen Sohlmaterialien für experimentelle Untersuchungen werden fortgesetzt (Ettmer 2012).
- Fertigstellung der interdisziplinären Buch-Publikation mit der BfG und Dritten zu alternativen und ökologisch optimierten Bühnen.
- Inbetriebnahme der neuen Kipprinne (40 cm) für hydraulische und morphologische Grundsatzuntersuchungen.

Laufzeit des Vorhabens: 1999 bis 2015.

#### 5 Literatur

-/-

#### 6 Veröffentlichungen

Ettmer, B. (2012): Nachbildung von Sieblinien aus künstlichen Sohlenmaterialien in experimentellen Untersuchungen. Hochschule Magdeburg-Stendal, Fachbereich Wasser- und Kreislaufwirtschaft. Magdeburg 2012. Bericht im Auftrag der BAW

Hentschel, B. (2014): Ökologisch optimierte Bühnen. 4. Burgdorfer Wasserbautag 2014, „Bauen im Wasser“. Fachveranstaltung am 19.11.2014 in Burgdorf, Schweiz. Abdruck im Tagungsband



## **Effizienz- und Genauigkeitssteigerung der Modellierung der Hydrodynamik der Flüsse mit einem kombinierten Multigrid- und Subgrid-Ansatz**

**Netzplan-Nr.:** A39530270002

**Projektleiter/in:** Dr. R. Patzwahl, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Flussbau (W2), Prof. G. S. Stelling, TU Delft

**E-Mail:** regina.patzwahl@baw.de, g.s.stelling@tudelft.nl

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Bei der numerischen Modellierung von Flüssen ergibt sich oft ein Zielkonflikt zwischen der Genauigkeit und Korrektheit der Berechnung von Strömungszuständen und der zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten. Eine Effizienzsteigerung der Verfahren kann nicht nur durch Anwendung leistungsfähiger Hardware und entsprechender Programmieretechniken erreicht werden, sondern auch durch methodische Entwicklungen. Die sich in der Entwicklung befindende Subgrid-Methode erlaubt eine Erhöhung der Genauigkeit der Repräsentation der Bodentopographie des zu modellierenden Gebiets, ohne die Rechenaufwände zu erhöhen, und gleichzeitig eine wesentliche Verbesserung der Reproduktion von Überflutungs- und Trockenfallen-Prozessen (Casulli, Stelling 2010). Die bereits etablierte Multigrid-Methode, die eine Hierarchie der Haupt- und Subnetze nutzt, bringt eine Verbesserung der Effizienz des Lösungsverfahrens mit sich, insbesondere für (quasi-)stationäre Strömungszustände.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

- Wesentliche Effizienzsteigerung der Berechnung von quasi-stationären und auch stationären Strömungen in Flüssen bei gleichzeitiger Erhöhung der Genauigkeit (auch in Hinblick auf morphodynamische Berechnungen).
- Effiziente Nutzung der in immer höherer Genauigkeit vorliegenden Geländemodelle, mit dem Ziel, ein Gleichgewicht zwischen rechnerischem Aufwand und der Korrektheit der Modellierung zu finden.
- Vertiefung der fachlichen Beziehungen zwischen Deutschland und den Niederlanden und ihren wasserbaulichen Einrichtungen Rijkswaterstaat und Deltares sowie der TU Delft.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

- Analyse des Ist-Zustandes der numerischen Modellierung von Flüssen im Hinblick auf mögliche Verbesserungen der Modellierungsmethoden und deren Effizienzsteigerung.
- Entwicklung der Methoden für eine zur Topographie konsistent hoch aufgelöste Abbildung des Geschwindigkeitsfeldes auf Subgrid-Niveau.
- Untersuchung der Effizienz eines kombinierten Multigrid-/ Subgrid-Ansatzes zur Beschleunigung der Berechnung von stationären Strömungszuständen in Flüssen.
- Untersuchung der Genauigkeit der Subgrid-Methode bezüglich der Wiedergabe von Sohl-schubspannungsverteilungen auf Subgrid-Niveau im Hinblick auf die Anwendbarkeit der Entwicklung in der Modellierung morphologischer Prozesse.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Numerische Methoden für Strömungen mit freier Oberfläche und Morphodynamik der Flüsse, mit Betonung auf Multi- und Subgrid-Methoden.

### **3 Ergebnisse**

Im Berichtsjahr 2014 wurde hauptsächlich der Themenbereich „Effizienzsteigerung“ bearbeitet. Zum einen wurde die Modellierung von Regelungsbauwerken unter Anwendung des Subgrid-Ansatzes anhand eines 11 km langen, 150 Buhnen beinhaltenden Flussmodells untersucht. Das in der BAW vorhandene Verfahren UnTRIM<sup>2</sup> (Casulli, 2009) kam dabei zum Einsatz. Bei einer Modellierung mit

Subgrid-Ansatz muss zwischen Berechnungsgitter und dem unterliegenden, die Topographie gebenden Subgrid (in Auflösung des vorliegenden DGMS) differenziert werden. Mit einem solchen Ansatz werden die Volumen in den Rechenzellen auf Basis des vorliegenden DGMS exakt berechnet.

Name	Auflösung in L <sup>1</sup> [m]	Auflösung in W <sup>2</sup> [m]	% der Buhnen teilweise erfasst	% der Buhnen vollständig erfasst <sup>4</sup>	Zeitschritt [s]	Anzahl Elemente	ΔWSP <sup>5</sup> Umströmt [m]	ΔWSP Überströmt [m]	x-mal Schneller Als Referenz
Fitted <sup>3</sup>	32 – 11	11,7	100		20		-0,05	-0,04	29
Grob	32	16	20	18	30	5512	-0,05	-0,15	97
Mittel	16	8	34	41	15	22049	-0,04	-0,06	26
Fein	8	4	32	66	7,5	88192	-0,01	-0,03	6
Sehr Fein	4	2		100	3,75	352512	Referenz	Referenz	1

<sup>1</sup>: in Strömungsrichtung, <sup>2</sup>: in Querrichtung, <sup>3</sup>: Netz so grob wie möglich, aber Kanten auf Buhnen, <sup>4</sup>: im Sinne eines Hindernisses aber nicht unbedingt vollständig im Sinne der korrekten Bauwerkshöhe

<sup>5</sup>: Wasserspiegeldifferenz (Maximalwert bzw. Verlust auf gesamter Strecke) zwischen dem Referenznetz und dem Netz

Tabelle 1: Eigenschaften der verwendeten Gitternetz-Familie

Es galt, zunächst in 2D, herauszufinden, in welcher Größenordnung die Abweichung der berechneten Rückstauwirkung der Buhnen in Abhängigkeit vom Detailgrad ihrer Abbildung ist. Dazu wurde eine Berechnungsnetz-Familie mit regelmäßiger Vierecks-Struktur erstellt (siehe Tabelle 1). Dieses Vorgehen sichert bestmöglich vergleichbare numerische Eigenschaften innerhalb der Netzfamilie, kann aber nicht die optimale Abbildung der Buhne garantieren. Es wurden zwei Abflusszustände (umströmt, überströmt) gerechnet.

Es zeigt sich, dass die Wasserspiegeldifferenzen, mit Ausnahme des groben Netzes, alle im Bereich der Kalibriergenauigkeit ( $\pm 0,05$  m) liegen, dafür aber bis zu 30 mal schneller berechnet werden. Vergleiche zwischen identischen Berechnungsnetzen mit und ohne Subgrid lieferten für das grobe Netz im überströmten Fall Abweichungen von maximal 15 cm und für das feine Netz Abweichungen von maximal 4 cm. Entscheidend sind der Anteil der abgebildeten Bauwerke auf dem Netz und die Genauigkeit dieser Abbildung. Bild 1 soll das Wirkungsprinzip des Subgrids in einem umströmten Fall erläutern. Graue Linien zeigen das Rechenetz. Das darunterliegende Subgrid bildet die als Farbflächen dargestellte Topographie hochaufgelöst ab. Die unterstromige Buhne ist im Netz über die Rechenkante als Strömungshindernis erfasst und lenkt die Strömung. Die oberstromige Buhne innerhalb eines Rechenelements wirkt immerhin volumenverringend. Die Untersuchung lässt den Schluss zu, dass sich bei optimaler Berücksichtigung der hydraulisch relevanten Strukturen im Sinne der Strömunglenkung in ansonsten groben Rechengittern Subgrid-unterstützt sehr gute Ergebnisse effizient erreichen lassen.

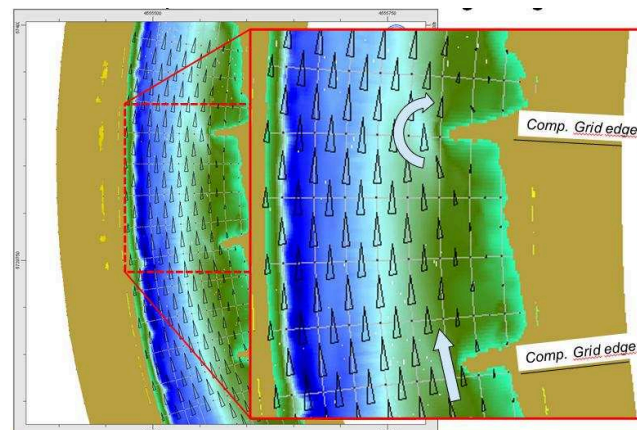
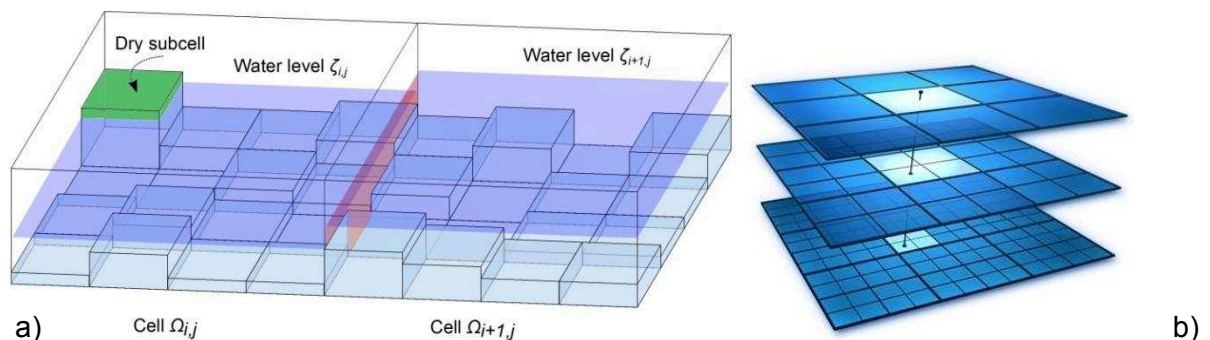


Bild 1: Ergebnis-Ausschnitt aus einer numerischen 2D-HN-Berechnung auf einem groben Berechnungsgitter mit Subgrid

Zum anderen wurde die Effizienzsteigerung bei Berechnungen mit stationären Randbedingungen mittels einer Kombination des Subgrid-Ansatzes (Bild 2a) mit strukturierten, hierarchischen Netzen (Bild 2b) untersucht. Das Kernproblem der hierarchischen Netze ist die Abhängigkeit der abgebildeten Geometrie von der Auflösung der einzelnen Netze. Bei Verwendung des Subgrid-Ansatzes ist die Abbildung der Topographie auf allen Netzen identisch. So ist das größte und effizienteste Netz bereits ausreichend genau für die Spin-up-Phase des Modells. Das in den vorangegangenen Jahren entwickelte, zwei-dimensionale, tiefengemittelte numerische Verfahren wurde weiter verbessert und für den Elbe-Abschnitt zwischen Lauenburg und Geesthacht *eingesetzt*. Als Referenz dienten sowohl ein klassisches, numerisches Modell mit 2 x 2 m horizontaler Auflösung und einer Gesamtlänge von 18 km als auch Naturmessungen. Es wurden sechs strukturierte, hierarchische Netze aufgebaut. Das größte ist Netz 6 mit einer Netzweite von 64 x 64 m. Von einem zum nächsten Netz wurde die Netzweite jeweils halbiert. Das feinste Netz (Netz 1) hat eine Netzweite von 2 x 2 m.

Der stationäre Zustand wird auf Netz 6 in vernachlässigbarer Zeit erreicht. Subgrid-unterstützt wird das Ergebnis dieses Netzes auf das nächst-feinere Netz interpoliert und auf diesem bis zu einem stationären Zustand gerechnet und so weiter. Auf diese Art wird eine Reihe von Ergebnissen auf den hierarchischen Netzen erzeugt. So liefert das Vorgehen automatisch eine Konvergenzstudie für ein gegebenes Modell und eine gegebene Fragestellung. Das Ergebnis auf Netz 3 (8 x 8 m) ist bereits ausreichend genau und wurde achtzehn mal schneller erreicht als eine Berechnung nur auf dem feinsten Netz 1. Die Stärke dieses Vorgehens kann auch für Berechnungen mit instationären Randbedingungen eingesetzt werden, da die Startbedingung für ein feines Netz effizient auf einem größeren Netz erzeugt werden kann.

Die Untersuchungen geeigneter Modellierungsansätze für überströmte Buhnen anhand von Messdaten und hydro-numerischen Rechnungen an einer Laborrinne unter Berücksichtigung von verschiedener Dimensionalität, Auflösung, (nicht-)hydrostatischer Ansatz, Advektionsschemata und Turbulenzmodellen haben nicht die erwarteten Ergebnisse gebracht und werden nicht weiter verfolgt.



**Bild 2:** a) Verwendung der Subgrid-Methode innerhalb zweier Berechnungszellen auf einem strukturierten Vierecksgitter. b) Eine Sequenz von drei hierarchischen (rechteckigen) Netzen. Die Berechnungen werden auf dem größten Gitter gestartet und die Ergebnisse auf das nächst-feinere interpoliert

Die Ergebnisse wurden intern und extern zu verschiedenen Gelegenheiten (u. a. UnTRIM User Workshop 2014) präsentiert und eine Veröffentlichung befindet sich bei einem peer-reviewed Journal im Review.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2015:
- Der Einfluss des Advektionsansatzes und des Rechengitters auf die Ergebnisse wird untersucht. Ziel ist die numerische (nicht-physikalische) Dissipation/Diffusion zu quantifizieren, abhängig vom Rechengitter und der Strömung. Dazu wird eine Reihe von relevanten Testbeispielen systematisch mit verschiedenen Verfahren, Modelleinstellungen und Rechengittern berechnet. Hauptziel bei jedem Beispiel ist es, die numerische Stauwirkung und damit die numerischen Verluste festzustellen.
  - Veröffentlichung, Dissertation

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2015

## 5 Literatur

Casulli V., Stelling G.S. (2010) Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows. Erschienen online, International Journal for Numerical Methods in Fluids, doi: 10.1002/fld.2361.

## 6 Veröffentlichungen

Patzwahl, R., Baron, M. (2013): Influence of Numerical Schemes in Representing Flow Over and Around Groynes. Proceedings XXth Telemac Users Conference, Karlsruhe.

Platzek, F.W., Stelling, G.S., Jankowski, J.A., Patzwahl, R. (2012): On the representation of bottom shear stress in z-layer models. Proceedings of HIC 2012 - 10th International Conference on Hydroinformatics, Hamburg, Germany, July 14-18, 2012.

Platzek, F.W., Stelling, G.S., Jankowski, J.A., Pietrzak, J.D. (2014): Accurate vertical profiles of turbulent flow in z-layer models. Water Resour. Res., 50, doi:10.1002/2013WR014411.

Platzek, F.W., Stelling, G.S., Jankowski, J.A., Patzwahl, R., Pietrzak, J.D. (eingereicht) An efficient semi-implicit subgrid method for free-surface flows on hierarchical grids. Submitted to Int. J. Numer. Meth. Fluids.

## **Entwicklung eines vereinfachten Füllsystems für Sparschleusen**

**Netzplan-Nr.:** A39530370002

**Projektleiter:** Dr.-Ing. C. Thorenz, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Wasserbauwerke (W3)

**E-Mail:** carsten.thorenz@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Für Sparschleusen mit großer Hubhöhe hat sich in Deutschland ein Füllsystem mit einer Druckkammer unter der eigentlichen Schleusenkammer als einfache Gestaltungsvariante bewährt. Hierbei dient die Druckkammer zur gleichmäßigen Verteilung des einströmenden Füllwassers von Oberstrom und den Sparbecken. Die Einläufe werden dabei aufwändig gestaltet und möglichst tief angeordnet, um das Einziehen von Luft in das Füllsystem zu verhindern. Im Zuge der Bearbeitung der hydraulischen Gestaltung des Füll- und Entleersystems der neuen Schleusen Erlangen und Kriegenbrunn wurde die Idee verfolgt, auf Umläufe (und die zugehörigen Schütze) sowie einen tiefliegenden Einlaufbereich zum Anschluss an das Oberwasser vollständig zu verzichten. Hierzu wurde ein Konzept entwickelt, bei dem das Druckkammerfüllsystem direkt über ein Drucksegmentobertor beaufschlagt wird. Erste numerische Untersuchungen zeigten, dass die hydraulische Leistungsfähigkeit bei Normalbetrieb den Anforderungen entspricht, Thorenz, C., Strybny, J. (2012). Im gestörten Betrieb ohne Sparbecken ist jedoch mit einem verstärkten Eintrag von Luft in das Füllsystem zu rechnen, welche die globalen Strömungseigenschaften des Systems maßgeblich beeinflussen könnten. Möglichst genaue Informationen über das Verhalten der Luft-Wasser-Strömung im untersuchten System sind daher von großer Bedeutung. Im Bereich der gegenständlichen Maßstabsmodelle ergeben sich durch die Skalierung unvermeidbare Maßstabeffekte, die bei Luft-Wasser-Gemischen dazu führen, dass der tatsächliche Lufteintrag und die daraus entstehenden Effekte nicht maßstabsgetreu abgebildet werden. Dies resultiert vor allem daraus, dass an der Phasengrenzfläche die Oberflächenspannung des Wassers eine entscheidende Rolle spielt, welche selbst bei der Verwendung eines Ersatzfluids mit entsprechender Oberflächenspannung das Verhalten der Luftblasen im Wasser nur fehlerhaft abbilden kann Chanson, H. (1999). Bei der Untersuchung von Strömungen mit Hilfe von numerischen Werkzeugen können nur dann brauchbare Ergebnisse erzielt werden, wenn alle physikalisch relevanten Prozesse im Modellansatz hinreichend genau abgebildet werden. Die im Wasserbau üblichen computergestützten Modelle, die auf den Navier-Stokes-Gleichungen mit einem Volume-of-Fluid-Ansatz basieren, sind nur bei sehr hoher Gitterauflösung geeignet, den erwarteten Lufteintrag abzubilden. Es muss daher ein alternativer Ansatz gefunden werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Das vereinfachte Füllsystem hätte erhebliche Vorteile: Kein großer und tiefer Einlauf wie bei anderen Sparschleusen mit großer Hubhöhe, durch den Verzicht auf Umläufe eine reduzierte Anzahl von schlecht erreichbaren Betriebsverschlüssen, eine reduzierte Größe der Baugrube und des Gesamtbauwerks. Es ist davon auszugehen, dass dieses Konzept bei Realisierbarkeit zu einer erheblichen Reduzierung der Baukosten und der Betriebskosten großer Sparschleusen führt.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, ein vorentworfenes, neuartiges Füllsystem für Sparschleusen auf seine Praxistauglichkeit zu untersuchen und ggf. zu verbessern. Dazu ist es erforderlich, auch die numerischen Werkzeuge für die Berechnung von Luft-Wasser-Gemischen sowie die Bewegung von Schiffen in der Kammer weiterzuentwickeln. Diese Weiterentwicklungen stellen ein wichtiges Nebenziel dar, da sie für vielfältige weitere Aufgaben anwendbar sind.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Im Rahmen des Vorhabens soll ein anwendungsorientierter numerischer Ansatz für die Beschreibung von Zweiphasenströmungen entwickelt werden, mit dem die Modellierung von unterschiedlichen

Strömungsregimes für Luft-Wasser-Gemische innerhalb eines Rechengbietes ermöglicht wird. Mit Hilfe dieses Ansatzes soll es möglich werden, ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen im Bereich von Luft-Wasser-Strömungen besser untersuchen zu können. Der entwickelte Ansatz soll möglichst in eine frei verfügbare CFD-Software (z. B. OpenFOAM, Weller, H. G. et al., 1998) implementiert werden. Parallel sollen die verfügbaren numerischen Methoden im Hinblick auf Luft-Wasser-Gemische sowie die Bewegung des Schiffs in der Kammer weiterentwickelt werden. Zum Vergleich wird ein Labormodell des vorgestellten Schleusenkonzepts erstellt. Da die Naturähnlichkeit der Luftblasenbewegung im Labormodell nicht gegeben ist, soll das Labormodell verwendet werden, um die Entwicklungen im numerischen Modell im Labormaßstab zu validieren, um dann mit dem numerischen Modell die Skalierung auf den Naturmaßstab durchzuführen.

### 3 Ergebnisse

Durch eine intensive Literaturrecherche wurde die Anwendbarkeit der bestehenden numerischen Modellansätze für die Modellierung von Luft-Wasser-Gemischen für die oben beschriebene Problematik überprüft. Für Flüssigkeit-Gas-Strömungen sind momentan die folgenden Modellansätze üblich:

- Phasengrenzen auflösende Verfahren über Volume-of-Fluid-Methode (VoF-Methode) oder Level-Set-Methode
- Euler-Euler-Verfahren (u. a. Zwei-Fluid-Modell)
- Euler-Lagrange-Verfahren

In Verfahren, die die Phasengrenze auflösen, werden die Erhaltungsgleichungen wie für einphasige Strömungen gelöst. Durch das Einführen einer zusätzlichen Indikatorfunktion können die Lage der Phasengrenze und damit die lokal anzusetzenden Fluideigenschaften bestimmt werden. Geeignet ist diese Methode besonders für Systeme mit Luft und Wasser, in denen keine große Vermischung auftritt. Luftblasen im Wasser oder Wassertropfen in der Luft können mit diesem Ansatz nur bei sehr feiner Gitterauflösung (Blasen- oder Tropfengröße > Gitterweite) abgebildet werden.

Das Euler-Euler-Verfahren dagegen eignet sich für die Abbildung von Strömungen, in denen sich die Phasen gegenseitig durchdringen, da hier für jede Phase ein Satz Erhaltungsgleichungen gelöst wird. Hier werden die Gasblasen parametrisiert und es kann das summarische Verhalten auch kleinster Gasblasen im Wasser abgebildet werden. Um das verschiedene Verhalten von verschiedenen Blasengrößen im Zwei-Fluid-Modell möglichst genau abzubilden, werden die Partikelgrößen (hier: Blasen) entweder mit Hilfe einer Größenverteilungsgleichung („population balance equation“ vgl. Silva, L. F. L. R., Lage P. L. C. (2011) abgebildet oder es wird ein Mehrphasen-Ansatz gewählt, bei dem jede Blasengröße als Einzelphase behandelt wird (vgl. Krepper, E. et al. 2008). Die größte Herausforderung dieses Ansatzes stellt die empirische Ermittlung der Terme dar, über welche die Interaktion zwischen den Phasen (Blasenerzeugung und -zerfall, Koaleszenz) gesteuert wird.

Beim Euler-Lagrange-Verfahren werden für die disperse Phase Newtonsche Bewegungsgleichungen für jedes einzelne disperse Partikel aufgestellt, die kontinuierliche Phase wird wie bei den anderen Verfahren über die Erhaltungsgleichungen als variable Funktionen von Raum und Zeit dargestellt. Bei einem hohem Anteil der dispersen Phase führt dieses Verfahren schnell zu einem sehr großen Rechenaufwand.

Um die oben beschriebenen Verfahren zu verbessern und anwendungstauglich zu gestalten, wurden in letzter Zeit verschiedene Methoden entwickelt, mit deren Hilfe einige der genannten Nachteile kompensiert werden können. Zum einen wird versucht, die verschiedenen Modelle zu koppeln, zum anderen werden die bestehenden Ansätze verändert und/oder erweitert.

Für eine Simulation des Luft-Wasser-Gemisches im Schleusenfüllsystem, bei dem Prozesse sehr unterschiedlicher Skalen von Bedeutung für die Abbildung des gesamten Strömungsregimes sind, stellt das von Damian, S. M. (2013) veröffentlichte „Extended Algebraic Slip Mixture Model“ eine gute Grundlage dar. Das Modell koppelt ein vereinfachtes Euler-Euler Modell, das sogenannte „Algebraic Slip Mixture Model“ (ASMM), mit der VoF Methode. Beim ASMM wird das Gleichungssystem für beide Phasen auf eine Massenerhaltungs- und eine Impulsgleichung für die Fluidmischung reduziert, eine zusätzliche algebraische Gleichung ermöglicht jedoch das in Betracht ziehen der unterschiedlichen

Geschwindigkeiten der zwei Phasen. So wird der Impulsaustausch zwischen den Phasen nicht wie beim VoF Modell komplett vernachlässigt, sondern über einen algebraischen Zusammenhang modelliert. Über die Formulierung der Gleichungen beider Modelle in gleicher Art und Weise schafft es Damian die beiden Modelle über einen „switching factor“ zu koppeln, der in Abhängigkeit vom Gradienten des Phasenanteils in den Zellen bestimmt, welches Modell in welchen Zellen verwendet wird. Die im Fall des ASMM Ansatzes benötigte Relativgeschwindigkeit zwischen den Phasen wird bei Damian über drei Variablen bestimmt, die für den jeweiligen Anwendungsfall zu kalibrieren sind.

Im Rahmen des FuE Vorhabens wurde zunächst der ASMM Ansatz in die Open Source Software OpenFOAM implementiert und anhand von Standardtestfällen getestet. Anfängliche Stabilitätsprobleme wurden behoben und verschiedene Diskretisierungsschemata wurden auf ihre Anwendbarkeit getestet. Im nächsten Schritt müssen insbesondere die empirischen Faktoren, von denen die Relativgeschwindigkeit zwischen den Phasen abhängt, kalibriert und/oder über andere Modelle hergeleitet werden. Außerdem ist zu untersuchen, ob durch die Kopplung mit dem Standard-VoF Löser bessere Ergebnisse erzielt werden können.

Im Weiteren ist zu prüfen, ob eine Erweiterung mit einem Modell notwendig ist, welches den Lufteintrag des fallenden Strahles im Fallschacht der Schleuse modelliert (z. B. in Analogie zum Ansatz von Ma et al., 2010), oder ob der Lufteintrag durch eine hohe lokale Gitterauflösung ausreichend genau abgebildet werden kann.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015: Numerik: Verbesserung des implementierten ASMM Ansatzes. Test des Ansatzes an geeigneten Beispielen.. Vergleich der Ergebnisse zwischen numerischen Modell und Labormodell. Anschließende Verbesserung des numerischen Ansatzes.

Labormodell: Fertigstellung des Labormodells und Test der neuen Messverfahren für Luftanteilmessung. Messreihen für verschiedene Schleusenfahrpläne, zur Untersuchung der Skalierungseffekte ist eventuell ist ein Ausschnittsmodell des Füllschachtes geplant.

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2015.

#### 5 Literatur

- Chanson, H. (1999): Air-water bubbly flows – Theory and applications, Dissertationsschrift, School of Engineering, The University of Queensland, Australien.
- Damian, S. M. (2013): An Extended Mixture Model for the Simultaneous Treatment of Short and Long Scale Interfaces, Dissertationsschrift, Universidad Nacional del Litoral, Argentinien.
- Krepper, E., Lucas, D., Frank, T., Prasser, H.-M., & Zwart, P. J. (2008): The inhomogeneous MUSIG model for the simulation of polydispersed flows. *Nuclear Engineering and Design*, 238(7), 1690–1702.
- Ma, J., Oberai, A. a., Drew, D. a., Lahey, R. T., & Moraga, F. J. (2010): A quantitative sub-grid air entrainment model for bubbly flows – plunging jets. *Computers & Fluids*, 39(1), 77–86.
- Silva, L. F. L. R., Lage, P. L. C. (2011): Development and implementation of a polydispersed multiphase flow model in OpenFOAM. *Computers & Chemical Engineering*, 35(12), 2653–2666.
- Weller, H.G., Tabor G., Jasak, H., Furby, C. (1998): A Tensorial Approach to CFD using Object Oriented Techniques, *Computers in Physics*, Vol. 12 No. 6, pp 620–631.

#### 6 Veröffentlichungen

- Thorenz, C., Strybny, J. (2012): On the numerical modelling of filling-emptying systems for locks, 10th International Conference on Hydroinformatics.
- Schulze, L., Thorenz C. (2013): Towards the CFD-modelling of multiscale-multiphase flow phenomena in aa navigation lock PIANC – SMART Rivers Conference 2013
- Schulze, L., Thorenz C., Stamm, J. (2014): Entwicklung eines numerischen Ansatzes für die Modellierung von Lufteintrag und –transport in einem Schleusenfüllsystem, 37. Dresdner Wasserbaukolloquium 2014.

**Koordinierte Bewirtschaftung von Staustufenketten – Modellierung und Betrieb****Netzplan-Nr.:** A39530370003**Projektleiter:** Dr.-Ing. P. Schmitt-Heiderich, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Wasserbauwerke (W3)**E-Mail:** peter.schmitt-heiderich@baw.de**1 Problemdarstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die lokale OW/Q-Regelung einer einzelnen Stauhaltung ist Stand der Technik und arbeitet in der Regel zuverlässig. Diese Regelung ist im Rahmen des FuE-Vorhabens "Optimierungsverfahren für die Parametrisierung von Reglern der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR)" analysiert worden und die Ergebnisse sind in den BAWMitteilungen 96 dokumentiert.

Das aktuelle FuE-Projekt konzentriert sich auf eine Kette von Stauhaltungen, deren Betrieb gegenüber einer reinen lokalen Regelung dann verbessert werden kann, wenn die lokalen Regler in vorgegebenen Grenzen „richtig gesteuert“ werden. Der BAW ist kein allgemeingültiges Verfahren bekannt, mit dem Ketten von Staustufen koordiniert bewirtschaftet werden. Die in der Forschung diskutierten Ansätze der modellprädiktiven Regelung (MPR) scheiden aus, da eine größere Zahl zu koordinierender Stauhaltungen (> 4 Stauhaltungen) eine klassische Optimierung nur mit massivem Rechneinsatz zulässt (Mehrkernprozessoren oder PC-Cluster) und die Zielfindung aufgrund der hohen Dimensionalität der Optimierung nicht zwangsläufig gegeben ist (Arnold, E. et. al, 2012).

Die Verbesserung der Bewirtschaftung einer Stauhaltungskette erfordert Eingriffe und komplexe Berechnungsalgorithmen auch auf der Ebene einer lokalen OW/Q-Regelung. Daraus resultiert die Frage, wie aufwändig und sicher diese Algorithmen auf eine echtzeitfähige Zielplattform übertragen werden können. Weiterhin kann am Beispiel der Stauhaltungskette Mosel schon heute erkannt werden, wie mehrere lokale Regelungen zusammenwirken. Diese nicht koordinierte Bewirtschaftung mehrerer Stauhaltungen lieferte bereits Aufschluss über Unsicherheiten und Verbesserungsmöglichkeiten.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Entwicklung einer standardisierten und optimierten Bewirtschaftung von Stauhaltungsketten bietet zahlreiche Vorteile für die WSV, da die Standardisierung die Einrichtung einer koordinierten Bewirtschaftung erheblich vereinfacht und den Übertrag auf andere Stauketten ermöglicht. Vorteile einer koordinierten Bewirtschaftung sind eine Abflussvergleichmäßigung, ein Ausgleich von Defiziten, ein Ausgleich von Störungen, beispielsweise durch Pumpspeicherbetrieb oder Mischwassereinleitungen und eine bessere Beherrschung extremer Wetterereignisse. Im Hinblick auf eine zukünftige Zentralwarte, die eine Staustufenkette mit begrenztem personellem Aufwand führen soll, stellt eine koordinierte Bewirtschaftung die dafür notwendigen Informationen bereit.

**1.3 Untersuchungsziel**

Das Untersuchungsziel ist die Entwicklung eines allgemeingültigen Ansatzes einer koordinierten Bewirtschaftung von Stauhaltungsketten. Hierfür sind folgende Teilaufgaben zu bearbeiten:

- Einrichtung und effektive Parametrisierung einer koordinierten Bewirtschaftung an Stauhaltungsketten. Hierfür sind die Algorithmen für die Bewirtschaftung allgemeingültig zu formulieren.
- Erarbeitung von vertieften Kenntnissen der Modellierung der Regelstrecke in Zusammenspiel mit Regelalgorithmen.
- Übertrag der koordinierten Bewirtschaftung auf eine Zielplattform und Nachweis, dass der Ansatz echtzeitfähig ist.



## 2 Untersuchungsmethoden

Allgemeingültiger Ansatz einer koordinierten Bewirtschaftung

Die Umsetzung der koordinierten Bewirtschaftung ist an der Mosel und am Neckar vorgesehen. Die Bearbeitung erfordert ein vertieftes Wissen über partielle Differentialgleichungen im Zusammenspiel mit der Regelung und der Optimierung gekoppelter Systeme. Die Regelungstechnik spricht bei Regelstrecken, deren Verhalten durch partielle Differentialgleichungen beschrieben wird, von Strecken mit verteilten Parametern. Die Regelung von Strecken mit verteilten Parametern ist ein aktuelles Forschungsgebiet der Universitäten. Die BAW ist aufgrund begrenzter Personalkapazitäten nicht in der Lage, diese Fragestellungen in der notwendigen Tiefe und Schnelligkeit zu bearbeiten. Das dafür notwendige Spezialwissen ist in der Universität Stuttgart (Prof. Sawodny) vorhanden, die daher über einen FuE-Kooperationsvertrag mit der Entwicklung eines allgemeingültigen Algorithmus zur koordinierten Bewirtschaftung von Staustufenketten beauftragt wurde.

## 3 Ergebnisse

Von Amann, K.-U. et al. (2013) wurde aufgezeigt, dass mit den linearisierten Hayami-Gleichungen die Wasserstands- und Abflussentwicklung in staugeregelten Gewässern modelliert werden können. Allerdings führt dieser Ansatz zu Fehlern bei Niedrigwasserabfluss. Eine deutliche Verbesserung wird mit linearisierten und grob diskretisierten Saint-Venantschen-Gleichungen (LSV) erhalten (Amann, K.-U. et al, 2014). Die Parameter der LSV sind abflussabhängig und werden aus stationären 1-D-HN Berechnungen abgeleitet.

Instationäre Berechnungen mit den LSV sind hinreichend genau und mindestens um den Faktor 10 schneller als 1-D-HN Berechnungen. Mit diesem schnellen Berechnungsansatz kann der Abfluss am Stellorgan vorgegeben werden unter der Bedingung, dass ein gewünschter Sollwasserstand als Führungsgröße eingehalten wird. Regelungstechnisch wird von einer invertierten LSV gesprochen, die den Abfluss als Zieltrajektorie für die Regelorgane vorgibt. Im Zusammenspiel mit der Modell-Prädiktiven Regelung (MPC ohne Rückkoppelung) kann der Abfluss unter Nutzung der Stauziel-toleranzen vergleichmäßig werden. Die Optimierungsaufgaben in der MPC minimieren dazu die Wasserstandsabweichungen und die Abflussabweichung gegenüber einem gleitenden Mittelwert. Die hieraus ermittelte Vorsteuerung ersetzt die Störgrößenaufschaltung einer OW/Q-Regelung und modifiziert die Führungsgröße „Wasserstand“ innerhalb der erlaubten Stauziel-toleranzen.

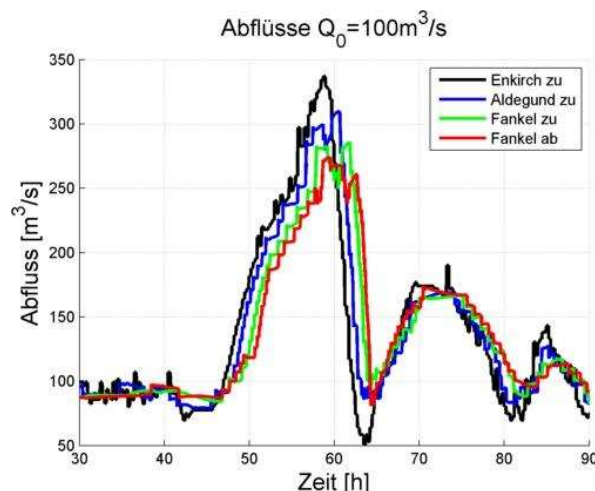


Bild 1: *Abflussvergleichmäßigung durch eine Vorsteuerung der Moselstauhaltungen Enkirch, St. Aldegund und Fankel*

Dies wird an den Moselstauhaltungen Enkirch, Aldegund und Fankel an einem Beispiel mit außergewöhnlich starken Abflussschwankungen erläutert. Das Abflussereignis ist von Gebhardt, M., Wohlfart, S. (2012) ausführlich beschrieben worden. Der dokumentierte Zufluss in die Stauhaltung Enkirch wird als Randzufluss angesetzt, um die Wirkung der MPC zu testen. Bild 1 zeigt die Dämpfung des Abflusses auf. Die Wirkung der Vorsteuerung wird mit Bild 2 näher erläutert.

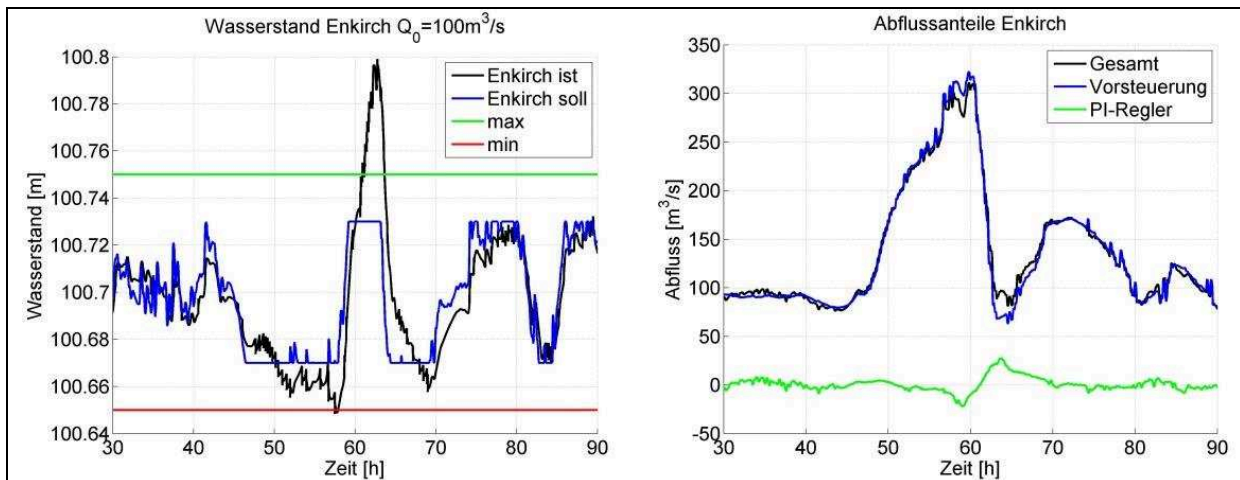


Bild 2: Zeitliche Entwicklung des Wasserstandes (linkes Diagramm) und der Vorsteuerung, PI-Anteile und des Gesamtabflusses der Moselstauhaltung Enkirch (rechtes Diagramm)

Der Sollwasserstand in Enkirch beträgt  $100,70 \text{ m} + \text{NN}$  und wird innerhalb einer Toleranz von  $\pm 3 \text{ cm}$  so geändert, dass der Wasserstand diesem folgen kann (linkes Diagramm in Bild 2). Damit kann das Unterschreiten des unteren Grenzwasserstandes verhindert werden. Gerade bei Niedrigwasser ist die Unterschreitung deutlich kritischer zu bewerten als eine Wasserstandüberschreitung. Aus dem rechten Diagramm in Bild 2 ist zu erkennen, dass der Gesamtabfluss nahezu vollständig durch die Vorsteuerung vorgegeben ist (Zieltrajektorie), der nur noch wenig durch den Regelausgang korrigiert werden muss.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Arbeiten der Universität Stuttgart zum allgemeingültigen Ansatz einer koordinierten Bewirtschaftung; 2015-2016:

- Implementierung und Test mit Sensitivitätsuntersuchungen.
- Das Entwurfsverfahren ist allgemeingültig zu formulieren, damit es als "Standardvorgehensweise" einer koordinierten Bewirtschaftung einer Staukette genutzt werden kann.
- Dokumentation.

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2016. Das Vorhaben kann 2015 nicht wie geplant abgeschlossen werden, da ein schwerer Brand am 15.06.2014 in der Universität Stuttgart die Räume des Institutes für Systemdynamik zerstörte. Die Laufzeit des Vorhabens muss bis Ende 2016 verlängert werden.

#### 5 Literatur

- Amann, K.-U., Arnold, E. und Sawodny, O. (2013): An inversion based model-predictive feed-forward discharge controller for impounded rivers. Proceedings of the 8th International Workshop on Multi-dimensional Systems (nDS), 9. – 11 Sept. 2013, Erlangen, Germany
- Arnold, E., Schmitt-Heiderich, P., Sawodny, O. (2012): Parametrisierung von Reglern zur automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR) – Stand von Wissenschaft und Technik. In BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 23-64.
- Gebhardt, M., Wohlfart, S. (2012): Die automatische Regelung einer Stauhaltungskette – Von den Voruntersuchungen bis zur Inbetriebnahme der automatisierten Moselstauufen. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 135-144.

#### 6 Veröffentlichungen

- Amann, K.-U.; Arnold, E.; Sawodny, O. (2014): Comparison of model based feed-forward control strategies for impounded rivers, Control Conference (ECC), 2014 European, pp.1361,1366, 24-27 June 2014; doi: 10.1109/ECC.2014.6862565"

**Wartezeiten vor Engstellen****Netzplan-Nr.:** A39530410036**Projektleiter:** Prof. Dr.-Ing. B. Söhngen, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W4)**E-Mail:** bernhard.soehngen@baw.de**1 Problemstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Wegen der anhaltenden Tendenz zum Bau größerer Fahrzeuge und der veränderten Zulassungsbedingungen für Fahrzeuge auf Binnenwasserstraßen, die generell größere Verbandszusammenstellungen erlauben, wird es vermehrt Wasserstraßenabschnitte geben, in denen nur bestimmte Fahrzeuge begegnen oder überholen können bzw. im Grenzfall sogar nur im Richtungsverkehr befahrbar sind wie am Mittelrhein im Bereich Jungferngrund-Loreley. Dies gilt vor allem für Bereiche, in denen es ggf. künftig zu Einschränkungen der Fahrrinnenbreiten zugunsten größerer Fahrrinntiefen kommen könnte oder in denen es bereits Abschnitte gibt, in denen die Solltiefe der Fahrrinne nur auf eingeschränkter Breite vorliegt wie an der Donau im Abschnitt Straubing-Vilshofen oder am Rhein zwischen Koblenz und Köln. Ein besonderes Problem sind hierbei extreme Niedrigwasserereignisse, die im Zeichen der Klimawandels voraussichtlich vermehrt auftreten werden und bei denen eine geringere verfügbare Fahrwasserbreite mit einem vermehrten Verkehrsaufkommen zusammenfällt, wie es jüngste Niedrigwasserereignisse auf dem Rhein gezeigt haben. Zur Erkennung und Bewertung von Engpässen und daraus folgenden Empfehlungen für Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen bzw. zur Neufestlegung der Fahrrinne, wie sie für den Rhein seitens des BMVBS und der beteiligten Außenstellen der GDWS am Rhein in einem Auftrag an die BAW zu untersuchen ist, sind deshalb, neben der Kenntnis des Verkehrsflächenbedarfs von Bemessungsschiffen im Vergleich zur vorhandenen Fahrwasserbreite, auch die verkehrlichen Randbedingungen zu beachten. Hierzu ist das Verkehrsgeschehen zu simulieren.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Wartezeiten vor Engstellen oder begrenzte Überholmöglichkeiten mindern den volkswirtschaftlichen Nutzen des Verkehrsträgers Binnenschiff. Dieser muss u. a. dem Aufwand zur Engstellenbeseitigung gegenübergestellt werden. Wenn dieser unverhältnismäßig hoch ist, können Engpässe, die Begegnungen oder Überholungen von Fahrzeugen ausschließen, hingenommen werden.

**1.3 Untersuchungsziel**

Die Untersuchungen zielen auf die Entwicklung, Verifikation und Anwendung eines Verkehrssimulationsmodells für Binnenschiffe in Gewässern, das mit möglichst wenigen Eingabedaten, z. B. hinsichtlich der Schiffsankünfte an Kontrollstellen, auskommt. Wegen eines Ende 2011 gestarteten Grundsatzauftrages der WSV zur Überprüfung von Fahrrinnenbreiten am freifließenden Rhein hat das Vorhaben eine besondere Aktualität und einen erweiterten Fokus erhalten. So soll nicht nur die Grenze möglicher verkehrlicher Situationen ausgelotet werden, sondern es sollen durch Einbeziehung des menschlichen Verhaltens der Schiffsführer auch Fahrsituationen einbezogen werden, die im Grunde technisch nicht zulässig oder möglich wären. Damit soll die Lücke zur Unfallanalyse geschlossen werden.

**2 Untersuchungsmethoden**

Die Simulation des Verkehrsgeschehens erfolgte bisher mit dem Verfahren BISS (Binnenschiffahrts-Simulator), das nach vorgegebenen fahrdynamischen Algorithmen der BAW von einer externen Firma im Auftrag der BAW entwickelt wurde. Die Verfahrensentwicklung ist algorithmisch abgeschlossen. Das Verfahren wurde erfolgreich auf Abschnitte der Mittelweser angewendet. Defizite zeigten sich bei der Implementierung in der BAW und vor allem bei der Handhabung des Programms von BAW-Mitarbeitern. Die Analyse der Programmarchitektur im Rahmen eines vorgesehenen Reengineering des Programms zeigte, dass diese den zukünftigen Anforderungen nicht genügt. Deshalb wurde eine

Neuentwicklung in Angriff genommen, wobei das Institut für Wirtschaft und Verkehr der TU Dresden als Entwickler gewonnen werden konnte. Dort werden seit vielen Jahren mikroskopische Verkehrssimulationsmodelle für den Straßenverkehr entwickelt und angewendet, bei denen das dynamische Verhalten jedes einzelnen Fahrzeugs durch entsprechende Bewegungsgleichungen modelliert wird (Treiber, M., Kersting, A. (2010)). Diese bilden zusätzlich auch das menschliche Verhalten der Fahrzeugführer ab. Alle Fahrzeugführer reagieren aufeinander nach festgelegten Regeln, die denen des Schiffsverkehrs sehr nahe kommen. Dabei wird von einem Verkehr auf mehreren, jedoch dynamisch angepassten Spuren mit Wechsel der Fahrspuren bei Begegnungen oder Überholungen ausgegangen. Der Verkehrsflächenbedarf, der die Spurbreite bestimmt, wird dabei für jedes Fahrzeug, jede Fahrzeugkombination und zu jedem Zeitpunkt errechnet und bestimmt die mögliche verkehrliche Situation. Die zugehörigen semiempirischen Algorithmen zu den Zusatzbreiten bei Kurvenfahrt, aus der Abdrift im Querströmungsfeld, der Instabilität des Schiffspfades oder aus der Fahrt in der Nähe von geböschten Ufern oder von Bühnen sowie aus der Interaktion zweier Schiffe bei Begegnungen oder Überholungen, wurden im Rahmen des KLIWAS TP 4.4 entwickelt und inzwischen implementiert. Die Gleichungen zur Längsbewegung eines Schiffes, die die mögliche Schiffsgeschwindigkeit bestimmen, wurden für die Entwicklung des Programmes PeTra2D hergeleitet und anhand von Modell- und Naturdaten kalibriert. Hierzu gehören der Propellerschub, der Schiffswiderstand sowie die kritische Schiffsgeschwindigkeit, wobei diese Formeln Querprofilinformationen mit zugehörigen Strömungsgeschwindigkeiten benötigen, die alle 100 m bereitgestellt werden. Der Einfluss des „human factor“ auf die Längsbewegung wird derzeit über ein angepasstes „Intelligent Driver Modell“ erfasst.

### 3 Ergebnisse

Nachdem erste Simulationsergebnisse mit dem physikalischen Bewegungsmodell und dem Begegnungsmodell erzielt werden konnten, wurden diese im Jahr 2014 auf dem PIANC World Congress in San Francisco vorgestellt (Fischer, N. et al 2014). Des Weiteren stand die Formulierung und Implementierung eines Überholmodells im Fokus der Entwicklungsarbeit. Zu diesem Zweck wurden große Mengen Schiffstrajektorien aus AIS-Daten ausgewertet, indem zunächst Überholvorgänge identifiziert und anschließend analysiert wurden. Bild 1 zeigt beispielhaft für die Bergfahrer die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Überholer und Überholtem in Abhängigkeit vom Bug-Heck Abstand der beiden Fahrzeuge. Dieser Abstand wird entlang der Flussachse gemessen und ist vor dem Manöver positiv. Sobald die Schiffe überlappen wird der Abstand negativ. Eine negative Geschwindigkeitsdifferenz bedeutet eine größere Geschwindigkeit des Überholers.

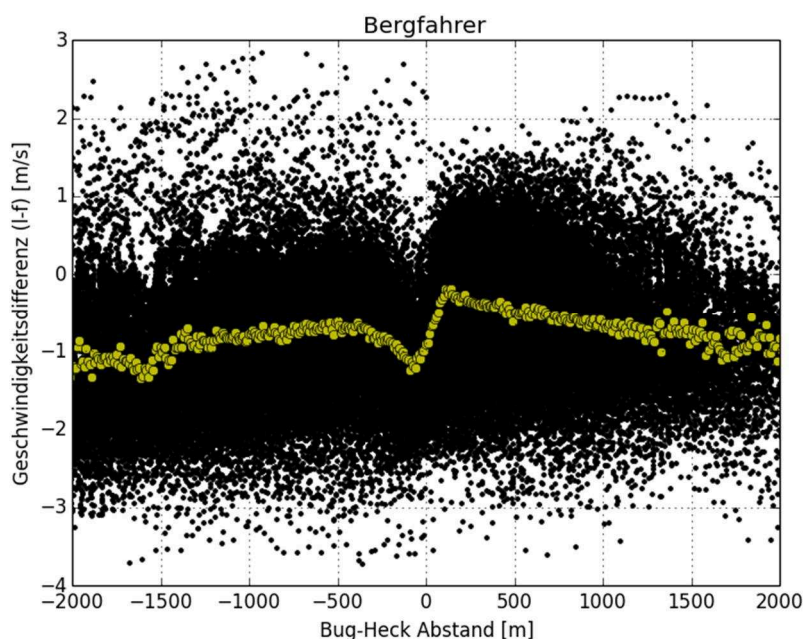


Bild 1: Einfache (schwarz) und gemittelte (gelb) Geschwindigkeitsdifferenzen in Abhängigkeit vom Bug-Heck Abstand. Gezeigt sind nur Überholvorgänge von Bergfahrern.

Es ist zu erkennen, dass die Geschwindigkeitsdifferenz mit der Annäherung abnimmt, bis beide Fahrzeuge in einem Abstand von ca. 120 m hintereinander herfahren. Das eigentliche Überholmanöver erfolgt mit einer größeren Geschwindigkeitsdifferenz als die Annäherungsphase. Die Differenz nimmt nach dem Überholmanöver wieder ab.

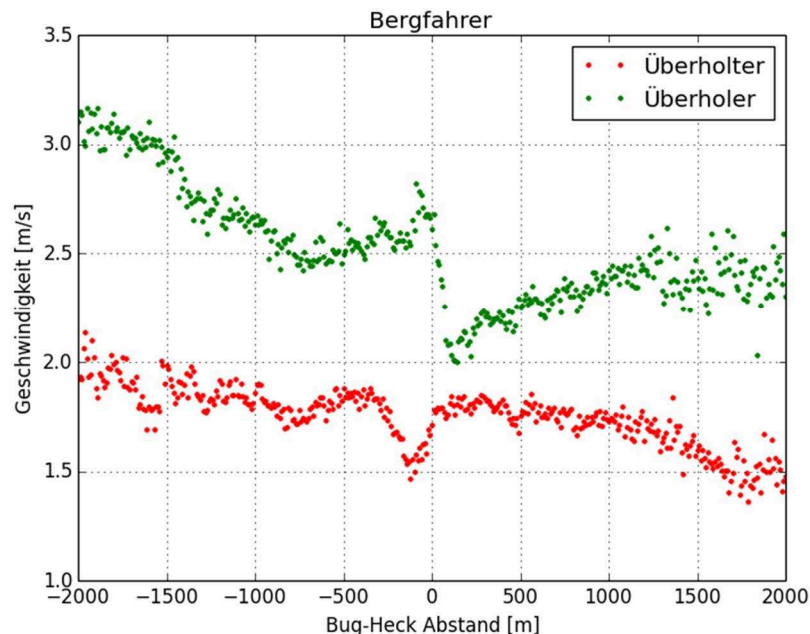


Bild 2: Gemittelte Geschwindigkeit des Überholers (grün) und des Überholten (rot) in Abhängigkeit vom Bug-Heck Abstand. Gezeigt sind nur Überholvorgänge von Bergfahrern.

In Bild 2 ist die gemittelte Geschwindigkeit des Überholers und des Überholten wie zuvor in Abhängigkeit vom Bug-Heck Abstand aufgetragen. Deutlich ist zu erkennen, dass der Überholer bei der Annäherung seine Fahrt zunächst reduziert. Während des Überholmanövers erhöht der Überholer seine Geschwindigkeit, während der Überholte sie kurzfristig reduziert. Dieses Verhalten der Schiffsführer wird durch das entwickelte Überholmodell wiedergegeben.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Im Arbeitsjahr 2015 steht die Generierung von Eingangsdaten für die Simulation im Vordergrund. Insbesondere werden Daten zur Verkehrsstärke in Form von Tagesganglinien und Informationen über die Zusammensetzung der Flotte auf den simulierten Abschnitten benötigt. Darüber hinaus müssen Abladeregeln für verschiedene Wasserstände implementiert werden, da der Tiefgang einen wesentlichen Einfluss auf die Fahrdynamik und den Flächenbedarf hat.

Der nächste Schritt ist die Simulation des Verkehrs auf einer Musterstrecke auf Basis dieser Daten und der Vergleich des simulierten Verkehrsgeschehens mit der Realität. Zu diesem Zweck werden AIS-Daten und Videobeobachtungen herangezogen.

Laufzeit des Vorhabens: 2001 bis 2015.

#### 5 Literatur

Treiber, M., Kersting, A. (2010): Verkehrsdynamik und -simulation. Springer-Verlag.

#### 6 Veröffentlichungen

Fischer, N., Treiber, M., Söhngen, B. (2014): Modeling and Simulating Traffic Flow on Inland Waterways. Proceedings of the XXXIIIth PIANC World Congress, San Francisco, 2014.

## **Einwirkung des Propellerstrahls auf die Gewässersohle**

**Netzplan-Nr.:** A39530410038

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. D. Spitzer, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W4)

**E-Mail:** detlef.spitzer@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Infolge immer größerer und stärker motorisierter Fahrzeuge gewinnt die Belastung von Gewässersohle und -ufer durch Schraubenstrahlen auf vielen Bundeswasserstraßen an Bedeutung und kann die Bemessung von Deckwerken maßgebend bestimmen. Unsicherheiten bei der Anwendung vorliegender Verfahren zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen durch Propulsionsströmungen gaben Anlass dazu, den Kenntnisstand grundlegend aufzuarbeiten. Dies erfolgte im Rahmen des FuE-Projekts in enger Zusammenarbeit der BAW mit dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) der TU Braunschweig zunächst auf Grundlage einer umfassenden Literaturrecherche und der Auswertung vorliegender Messdaten. Die Analysen führten zu neuen Berechnungsansätzen für die zeitliche Entwicklung des Schraubenkolks und der Endkolkentiefe. Mit diesen kann die schraubenstrahlinduzierte Kolkentiefe mit einer höheren Genauigkeit und in einem größeren Gültigkeitsbereich prognostiziert werden als mit bisherigen Ansätzen. Allerdings zeigte sich ein erheblicher Forschungsbedarf. Um bestehende Unsicherheiten aus den Wirkungen von Schiffsantrieb, Heckform und Ruderausbildung auf die Strahlausbreitung, bei der Bestimmung des sohlennahen Strömungsfeldes und der Sohlenschubspannung sowie in der Erfassung der zeitlichen Entwicklung des Kolks in unterschiedlichen Sohlenmaterialien zu minimieren, sind weiterführende physikalische Modelluntersuchungen erforderlich.

Die durch den Schraubenstrahl induzierte Sohlenerosion ist ein sehr komplexer Vorgang und durch einfache analytische Ansätze nur schwer zu erfassen. Ein Lösungsweg zur Verbesserung und Erweiterung vorhandener semiempirischer Berechnungsmethoden wird in der Entwicklung geeigneter Modelle für zeitabhängige turbulente Strömungen in Verbindung mit hocheffizienten Verfahren gesehen. Die numerische Behandlung komplexer Geometrien und Strömungen ist gegenwärtig aufgrund der hohen Rechenzeiten mit konventionellen CFD-Verfahren nur begrenzt möglich. Innovative mathematische Modellverfahren wie z. B. die Lattice-Boltzmann-Methode (LBM) aus der Gasdynamik erfordern durch ihre Eignung für massiv-parallele Hardware (insbesondere General Purpose Graphics Processing Units, sog. GPGPUs) deutlich weniger Rechenzeit. Um ihre Anwendbarkeit für die Simulation der Schraubenstrahlausbreitung und der resultierenden Sohlenerosion nachzuweisen, wurden im Rahmen des Projekts Validierungs- und HN-Berechnungen am Institut für rechnergestützte Modellierung im Bauingenieurwesen (iRMB) der TU Braunschweig durchgeführt, Krafczyk, M. (2014).

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Untersuchungen führen zu einer Verbesserung der bestehenden Berechnungsverfahren zum Einfluss von Schraubenstrahlen auf die Sohlenerosion, die u. a. Eingang finden in die von der BAW für die Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen entwickelten Software GBBSOFT. Zudem können die Messdaten aus experimentellen Untersuchungen für die Kalibrierung und Weiterentwicklung von numerischen Verfahren herangezogen werden. Das Fernziel besteht im Einsatz eines geeigneten numerischen Verfahrens als Schnittstelle zum Softwarepaket GBBSOFT, wodurch die Erweiterung und Verbesserung von analytischen Ansätzen für die Schraubenstrahlbelastung ermöglicht werden kann.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Die komplexen Zusammenhänge der Kolkbildung durch Propellerstrahlen und messtechnische Probleme bei der Anwendung des 2D-PIV-Verfahrens zur Erfassung des Strömungsfeldes des Schraubenstrahls über einer festen Sohle erforderten weitergehende experimentelle Untersuchungen am LWI mit der Hauptzielsetzung, eine semi-empirische Methode zur Kolkiefenbestimmung infolge eines Schrau-

benstrahlungsgriffs zu entwickeln. Die Experimente im Berichtsjahr beinhalteten die Durchführung von Kolkversuchen infolge kurzzeitiger Belastungen (Anfahrversuche) gemäß der Projektplanung sowie von ausgewählten Zusatzuntersuchungen zur Kolkbildung für den Fall der Manövriersituation (Schiffsgeschwindigkeit  $v_s = 0$ ). Das Ziel der Zusatzversuche bestand darin, Einflüsse aus der Überdeckungshöhe des Propellers sowie des Abstandes zur Sohle auf den Kolkvorgang eingehender zu analysieren. Vertiefende experimentelle Untersuchungen erfolgten zudem zur Klärung der Frage, inwiefern die Rauheit einer Sohle die Größe und Verteilung der propellerinduzierten sohlennahen Geschwindigkeit beeinflusst.

## 2 Untersuchungsmethoden

Die Anfahrversuche wurden im Versuchsbecken des LWI mit dem GMS-Hinterschiffsmodell (Gesamt-abmessungen in der Natur: 110 m Länge und 11,45 m Breite) im Maßstab 1:16 mit einem Wagenin-gen-Propeller mit Zentralruder sowie einem Kaplan-Düsenpropeller mit Doppelruder (s. Bild 2) als Antriebssystem durchgeführt. Als Sohlsediment kamen Grobsand mit einem Korndurchmesser  $d_{50} = 0,8$  mm sowie Feinkies mit  $d_{50} = 4,0$  mm zum Einsatz. Bei den Versuchen fuhr das Modellschiff mit zwei verschiedenen Tiefgängen bei gleichbleibender Propellerdrehzahl von einer vorgegebenen Startposition wiederholt aus dem Stand an und überfuhr das Sedimentbett im Modell auf einer Strecke von 3 m (entsprechend 48 m in der Natur). Die sich ausbildende Kolkgeometrie wurde punktweise mit einem Stechpegel nach einer, nach sieben und nach 15 Passagen in jeder Versuchsreihe registriert.

Darüber hinaus erfolgte in ausgewählten Versuchen die Erfassung des Propellerkolkes mittels eines 3D-Scanners bestehend aus einer Kamera und einem Laser. Das Messsystem wurde über dem Sedimentbett an einer Traverse fixiert, die eine Positionierung in Längs- und Querrichtung ermöglichte. Das Sedimentbett wurde vor der ersten und nach der letzten Schiffsüberfahrt gescannt. Die Generierung von Echtzeit 3D-Daten erfolgte mit der im Institut für Robotik und Prozessinformatik der TU Braunschweig entwickelten Software DAVID. Bild 1 zeigt den Versuchsstand mit der Kamera und dem Scanner, der eine Linie in einen aufzunehmenden Messquerschnitt projiziert.



*Bild 1: Aufmessen des Sohlprofils mit dem Laserscanner, Geisenhainer, P., Koll, K. (2014)*



*Bild 2: Heckansicht des Schiffsmodells über der rauen Kiessohle, Inselmann, L. (2014)*

Zur Untersuchung der Schraubenstrahlausbreitung hinter einem ortsfesten Binnenschiff wurden in der Versuchshalle des LWI alternativ zu den PIV-Untersuchungen, Nardone, P. et al., (2014), im Rahmen von zwei Bachelorarbeiten Geschwindigkeitsmessungen im Schraubenstrahl über fester Sohle mit ADV-Sonden durchgeführt, Jäger, I. (2013), Inselmann, L. (2014). Ermittelt wurden in zwei Versuchsreihen die propellerinduzierten Geschwindigkeiten über einer glatten und einer rauen festen Sohle. Die raue Sohle wurde durch Aufkleben von Feinkies hergestellt. Eine Heckansicht des Schiffsmodells im Versuchsstand mit der rauen Sohle zeigt Bild 2.

Für die Untersuchung des Einflusses der Sohlrauheit auf die Schraubenstrahlausbreitung wurden in beiden Varianten der Wageningen-Propeller mit Zentralruder und der Kaplan-Düsenpropeller mit Doppelruder untersucht. Die Geschwindigkeitsmessungen erfolgten punktuell in zwei horizontalen Achsen in der lotrechten Ebene der Propellerachse, 0,5 cm über der Sohle und in Höhe der Propellerachse. Die Untersuchung wurde für zwei Schiffstiefgänge und einer Variation der Propellerdrehzahl in 9 Stufen durchgeführt. Aus den Daten der ADV-Sonde wurden zeitliche Mittelwerte der axialen Ge-

schwindigkeitskomponente bestimmt, die im Weiteren für die Versuchsauswertung herangezogen wurden.

### 3 Ergebnisse

Ergebnisse der Anfahrversuche zum Einfluss der Antriebssysteme, des Sohlmaterials und des Propellerabstandes über der Sohle auf die Kolkbildung werden detailliert von Geisenhainer, P., Koll, Ka. (2014) dargelegt. Die typische Verformung der Sohle durch das anfahrende Schiff wird am Beispiel der einmaligen Schiffspassage über der Sandsohle für den Wageningen-Propeller mit Zentralruder in Bild 3 veranschaulicht. Eine Darstellung des Kolkprofils auf Grundlage eines 3D-Scans nach 15 Schiffspassagen über das Kiesbett zeigt Bild 4.

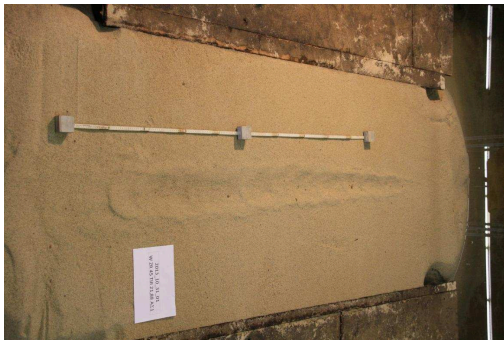


Bild 3: Kolkgeometrie nach einmaliger Überfahrt des GMS mit Wageningen-Propeller und Zentralruder über der Sandsohle, Geisenhainer, P., Koll, Ka. (2014)

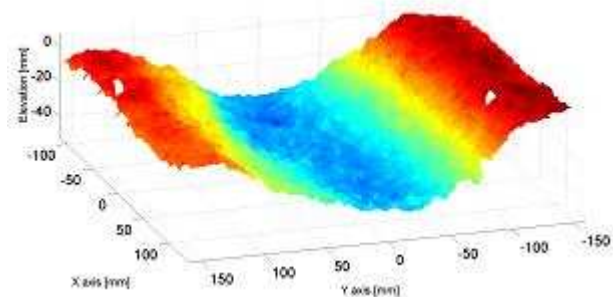


Bild 4: Kolkdetail mit Daten des 3D-Laserscans nach 15 Fahrten über dem Kiesbett mit dem Wageningen-Propeller und Zentralruder, Geisenhainer, P., Koll, Ka. (2014)

Die Ausbildung der in Bild 3 gezeigten Kolkrinne kann darauf zurückgeführt werden, dass sich mit Fahrtaufnahme des Schiffes, d. h. wachsendem Propellerfortschrittsgrad, die induzierte Anfangsstrahlgeschwindigkeit und damit die maximale Strahlgeschwindigkeit an der Sohle verringert und zudem beim fahrenden Schiff die fortschreitende Sedimentumlagerung sukzessive zu einer partiellen Wiederauffüllung des zuvor entstandenen Kolkes führt. Die zwei untersuchten Antriebseinheiten bewirken jedoch Unterschiede in Kolkform und -größe. Allgemein bildet sich zu Beginn der Anfahrt einen Kolk mit lokal größerer Breite und Tiefe aus, dem mit zunehmender Fahrtaufnahme eine flacher und schmaler werdende Kolkrinne folgt, jedoch bedingt der Kaplan-Düsenpropeller mit Doppelruder gegenüber dem Wageningen-Propeller mit Zentralruder ein insgesamt horizontal ausgedehnteres Kolkprofil. Für beide untersuchten Sedimente waren die Kolke bei gleichen Propellerabständen über der Sohle beim Wageningen-Propeller größer, wobei der Unterschied für den größeren Tiefgang und somit dem kleineren Propellerabstand zur Sohle geringer ausfiel. Die Zunahme der Kolktiefe mit der Anzahl der Überfahrten weist beim Anfahren von Schiffen ebenso wie die zeitliche Kolkentwicklung des Schiffes im Stand auf einen logarithmischen Zusammenhang hin.

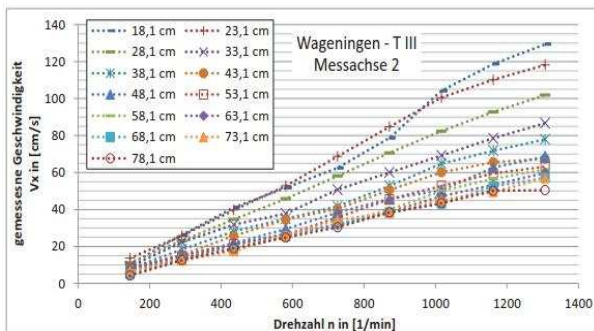


Bild 5: Längskomponente der Geschwindigkeit in der Messachse 2 als Funktion der Drehzahl mit dem Propellerabstand als Parameter

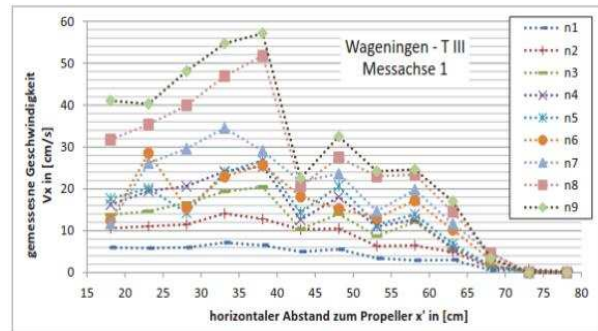


Bild 6: Längskomponente der sohlennahen Geschwindigkeit in der Messachse 1 mit der Propellerdrehzahl als Parameter



Das Ergebnis der ADV-Vergleichsuntersuchungen zum Einfluss der Sohlrauheit auf die Geschwindigkeit im Schraubenstrahl ist am Beispiel des GMS mit Wageningen-Propeller über der rauen Sohle in den Bildern 5 und 6 dargestellt (Tiefgang T III = 15,5 cm im Modell). Die Kurvenverläufe in Bild 5 bestätigen die theoretischen Erwartungen nach der einfachen Propellertheorie, wonach sich die Axialgeschwindigkeit im Schraubenstrahl proportional zur Propellerdrehzahl und indirekt proportional zur Entfernung von der Propellerebene erhöht. Bild 6 zeigt die Abhängigkeit der sohlennahen Geschwindigkeit in der Messachse 1 vom Propellerabstand für die jeweils vorgegebenen 9 Drehzahlen als Kurvenschar. Infolge der radialen Geschwindigkeitsverteilung im Schraubenstrahl nehmen die Längsgeschwindigkeiten mit dem Abstand zum Propeller zunächst zu und nähern sich nach Erreichen des Maximums asymptotisch der Geschwindigkeit Null an. Infolge der erhöhten turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen in sohlennähe ist der Kurvenverlauf weniger stetig als in der Messachse 2, für die Messpunkte kann jedoch auf den erwarteten linearen Zusammenhang zwischen Propellerdrehzahl und Strahlgeschwindigkeit geschlossen werden. Auf beiden Messachsen zeigten sich bezüglich Verlauf und Größe der Längsgeschwindigkeit Einflüsse der Sohlrauheit und der Antriebseinheiten.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Aufgrund unvorhergesehener personeller Engpässe sowie technischer Probleme bei der Anwendung des LED-basierten PIV-Verfahrens zur Erfassung des Geschwindigkeitsfeldes im Schraubenstrahl traten Verzögerungen in der Projektbearbeitung auf. Nach dem erfolgten Abschluss der gemäß Projektplanung vorgesehenen Modellversuche zum Schraubenkolk in der Manövriersituation und beim Anfahren in 2014 wurden die maßgebenden Einflussfaktoren wie Propellerdrehzahl, Sohlsediment, Propeller-Ruder-Anordnung, Höhenlage der Propellerachse über der Sohle und Versuchsdauer auf die Kolkbildung anhand des verfügbaren Datenmaterials analysiert, um den Erkenntnisstand zum Schraubenkolk zusammenzufassen und ggf. Datenlücken aufzuzeigen, Schneider, C. (2015). Im Ergebnis dieser Analyse werden Anfang 2015 im LWI abschließende Langzeit-Kolkuntersuchungen bis zum Erreichen der Endkolkentiefe unter Einbeziehung eines zusätzlichen gröberen kiesigen Sedimentes durchgeführt. Den Untersuchungsschwerpunkt bilden 2015 Geschwindigkeitsmessungen im Schraubenstrahl zur Erfassung des Einflusses der bei den Kolkuntersuchungen veränderten Randbedingungen, insbesondere auf die Anfangsstrahlgeschwindigkeit und die maximale sohlennahe Strahlgeschwindigkeit. Die Untersuchungen am LWI werden mit der Erstellung des Abschlussberichtes Ende 2015 abgeschlossen.

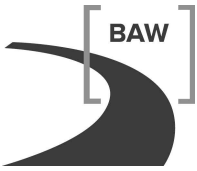
Laufzeit des Vorhabens: 2001 bis 2015.

#### 5 Literatur

- Krafczyk, M. (2014): Bericht zur Durchführung von Validierungs- und HN-Berechnungen zur Untersuchung der Schraubenstrahlausbreitung hinter einem stationären Großmotorgüterschiff mit dem Lattice-Boltzmann-Verfahren unter Verwendung von GPGPUs, Abschlussbericht, Consultant Computational Engineering, Braunschweig
- Jäger, I. (2013): Untersuchung des Geschwindigkeitsfeldes hinter einem Schiffspropeller unter Verwendung einer ADV-Sonde, Bachelorarbeit, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig
- Inselmann, L. (2014): Auswertung physikalischer Modellversuche zur Erfassung des Geschwindigkeitsfeldes hinter einem Schiffspropeller unter Verwendung einer ADV-Sonde über einer rauen Sohle und Vergleich mit den Ergebnissen der Versuche über einer glatten Sohle, Bachelorarbeit, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig
- Schneider, C. (2015): Auswertung von Modelluntersuchungen der TU-Braunschweig zur Kolkbildung aus dem Schraubstrahl von modernen Binnenschiffen, Bachelorarbeit, Institut für Hydromechanik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

#### 6 Veröffentlichungen

- Nardone, P., Geisenhainer, P., Koll, Ka., Di Cristo, C. (2014): Experimental investigation of a propeller jet induced velocity field, Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics River Flow 2014, 3–5 Sept. 2014, Lausanne, Switzerland. Schleiss et al. (Eds), 241–249



- Geisenhainer, P., und Koll, Ka. (2013): Einfluss der Propeller-Ruder-Anordnung auf die Kolk-tiefenentwicklung, Beitrag zum 15. JUWI-Treffen, 31.7.–02.08.2013, Graz, Österreich. Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz, Band 70, 149–156
- Geisenhainer, P., und Koll, Ka. (2014): Scour development caused by propeller jet of moving vessels, Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics River Flow 2014, 3–5 Sept. 2014, Lausanne, Switzerland. Schleiss et al. (Eds.), 1535–1543

## **Erweiterung des Binnenschiffsführungssimulators um die Berechnung schiffsinduzierter Wellen und Verbesserung des fahrdynamischen Modells**

**Netzplan-Nr.:** A39530470003

**Projektleiter:** BOR T. Dettmann, Dipl.-Ing. R. Zentgraf, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Fachgruppe Schiffsführungssimulation (W 4), Referat Flussbau (W2)

**E-Mail:** thorsten.dettmann@baw.de, rolf.zentgraf@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

In konsequenter Weiterführung der BAW-eigenen Entwicklung von Werkzeugen zur Beantwortung verkehrswasserbaulicher Fragestellungen wurde Ende 2009 durch die Bundesanstalt für Wasserbau für den Bereich Binnenschifffahrt der Schiffsführungssimulator ANS5000 beschafft. Ziel dieser Beschaffung war es, diesen Simulator soweit zu ertüchtigen, dass die in der BAW entwickelten Methoden zur Beschreibung der Fahrdynamik von Binnenschiffen in den Simulator integriert werden können, um ihn für verkehrswasserbauliche Untersuchungen einsetzen zu können. Im Vorfeld der Beschaffung des Schiffsführungssimulators ANS5000 wurde durch einen international anerkannten Fachexperten eine Analyse hinsichtlich der Möglichkeiten und Grenzen der in Europa vorhandenen Schiffsführungssimulatoren bezüglich der Bemessung von Schifffahrtsstraßen erstellt, die unter anderem zu folgenden Ergebnissen führte:

Stand der Technik bei den Herstellern zum Zeitpunkt der Beschaffung:

- Von fast allen Herstellern wurde bestätigt, dass in den vorangegangenen Jahren die Verbesserung des Sichtsystems vorrangig betrieben wurde und weniger eine Verbesserung der mathematischen Modelle.
- Viele Simulatoren wurden überwiegend als STCW-konforme (Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers) und damit relativ einfache Simulatoren geordert und verkauft.
- Die Entwicklung neuer und verbesserter mathematischer Modelle ist sehr kostenintensiv, was bei dem steigendem Konkurrenz- und Preisdruck nicht durchsetzbar war.
- Bei den kommerziellen Herstellern fehlt in vielen Fällen das notwendige direkte Know-how im Bereich Hydrodynamik/Hydraulik.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Aus dem Trend, dass immer größere Schiffe in den vorhandenen Wasserstraßen fahren (überlange Verbände auf dem Rhein, üGMS auf dem Neckar), gewinnen Fragestellungen wie z. B. nach dem Einfluss von Querströmungen auf die Fahrt eines Binnenschiffes, nach der Wechselwirkung Schiff/Schiff bzw. Schiff/Wasserstraße, nach dem Verkehrsflächenbedarf in der Manöverfahrt und nach Squat und Banking immer mehr an Bedeutung. Viele dieser Fragen lassen sich nur noch durch komplexe Simulationen der Schiffsbewegung beantworten, in denen das Schiff durch einen Bahnregler oder durch einen Schiffsführer nach Sicht gesteuert wird.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Der in der BAW Karlsruhe vorhandene Binnenschiffsführungssimulator ANS5000 wurde seitens des Herstellers soweit an die Belange der Binnenschifffahrt angepasst, dass die Steuerung des Simulationsschiffes über eine Binnenschiffsbrücke nach Sicht und Radar mit originalen Bedienelementen erfolgt. Alle notwendigen Anzeigeelemente erscheinen generisch auf Bildschirmen und gewährleisten so ein Höchstmaß an Flexibilität, indem die Anzeigeelemente an die unterschiedlichsten Schiffstypen bzw. Untersuchungsziele angepasst werden können.

Die in dem ANS5000 enthaltenen Modellverfahren sollen durch in der BAW entwickelte Verfahren erweitert werden, um den ANS5000 im Zusammenspiel mit den flussbaulichen HN-Modellen zum Werkzeug zur Beantwortung verkehrswasserbaulicher Fragestellungen zu ertüchtigen. Damit soll es möglich werden, insbesondere Manöversituationen wie z. B. Schleusen- oder Hafeneinfahrten, Fahrsituationen mit Wechselwirkung Schiff/Schiff und Schiff/Wasserstraße wie Brückendurchfahrten oder

die Durchfahrung von 2D-Strömungsfeldern, die die Fahrt des Schiffes beeinträchtigen, untersuchen und beurteilen zu können.

## 2 Untersuchungsmethoden

Numerische Methoden:

- Entwicklung von Rudermodellen (Heck- und Bugstrahlruder) basierend auf Ansätzen aus der Seeschifffahrt. Überarbeitung dieser Ansätze mittels Ergebnissen aus Modellversuchen sowie numerischen Berechnungen (BAW, 2005; Müller, 2009; Tenzer, 2009; SNAME, 1988/1989; Söding, 1986)
- Entwicklung eines Wellenmodells auf Basis der zuerst von Boussinesq 1872 für konstante Wassertiefe veröffentlichte und nach ihm benannten Boussinesq-Wellengleichungen (BoWave 2D) (Schröter, 2007-2014)
- Erhöhung der Auflösung des fahrdynamischen Modells des ANS5000 durch Implementierung von in der BAW entwickelten Modellverfahren z. B. durch Erweiterung des Ansatzes von Abkowitz (siehe z. B. Brix, 1993)
- Verbesserung der Kollisionserkennung und –modellierung (z. B. Simulation von Gleitmolen in der Binnenschifffahrt)

Physikalische Methoden:

- Einmessung von fahrenden Binnenschiffen und Aufzeichnung aller Maschinen- und Ruderkommandos mit anschließender Kalibrierung der Schiffsmodelle für den ANS5000 und Erstellung zugehöriger Validierungsdokumente (Cap. Brix, 1993)
- Durchführung von Schleppversuchen mit unterschiedlichen Schiffsmodellen inklusive Messung der Kräfte, die auf das Schiff wirken, und Messung der schiffsinduzierten Wellen und deren Ausbreitung.
- Erstellung eines Binnenreferenzschiffes: Erstellung eines BAW-eigenen Entwurfes für ein 135 m langes üGMS, Bau eines langlebigen Modells im Maßstab 1:16 und Durchführung von diversen Modellversuchen in Tief- und Flachwasser zur Schaffung eines vollständigen Datensatzes für Fahrt- und Manöversituationen zur umfassenden Kalibrierung von Modellverfahren für den Binnenschiffsführungssimulator.

## 3 Ergebnisse

Im Jahr 2014 wurden ein 110 m langes GMS in der Alleinfahrt und mit Leichter als Koppelverband ein- und zweispurig eingemessen. Die Modellierung dieser nautischen Einheiten sowie aller übrigen eingemessenen Schiffe wurde abgeschlossen. Damit verfügt die BAW für den Simulator inzwischen über 12 virtuelle Schiffseinheiten unterschiedlicher Abmessungen. Diese Flotte wird im Jahr 2015 erweitert.

Von dem Hersteller des ANS5000 wurde in enger Zusammenarbeit mit der BAW die PlugIn-Schnittstelle, mit deren Hilfe neue Modellverfahren in den Simulator integriert werden können, in ihrer Leistungsfähigkeit deutlich erweitert. Die Tests der neuen Schnittstelle wurden mit einem guten Ergebnis abgeschlossen.

Die Umsetzung des Verfahrens BoWave 2D auf eine Grafikkarte sowie die Verifizierung auf der Grundlage von physikalischen Modellversuchen wurden abgeschlossen. Sobald die neue PlugIn-Schnittstelle, die für den ANS6000 entwickelt wurde, in Betrieb geht, wird BoWave an den ANS6000 angeschlossen. Eine umfangreiche Validierungsstudie, in der die Versuche mit den Berechnungen aus BoWave verglichen werden, zeigt, dass die schiffsinduzierten Wellen in sehr guter Näherung mit den Ergebnissen aus den physikalischen Modellversuchen übereinstimmen. Die nächsten Entwicklungsarbeiten konzentrieren sich auf die Verifizierung von Vorhersagen der dynamischen Schwimmelage.

Innerhalb des Simulators erfolgt die Kollisionserkennung auf der Grundlage von 4 Tiefenlinien in der ENC. Von diesen aus wird die Entfernung zur Mittschiffsachse bestimmt und die halbe Schiffsbreite abgezogen. Da mit dem Simulator in der BAW die Wirkung von Gleitmolen untersucht werden soll, ist diese Art der Kollisionserkennung zu ungenau. Aus diesem Grund wurde eine Kollisionserkennung durch Vergleich der 3D Geometrie des Schiffes und der Wasserstraße entwickelt. Mit dem Upgrade

des Schiffsführungssimulators auf den Typ ANS6000 wird die neue Kollisionserkennung in den Simulator integriert.

Im Jahr 2014 wurde der Bau des Modells für das Referenzschiff der BAW abgeschlossen. In einer ersten Versuchsserie wurden im tiefen Wasser Schleppversuche und Planar motion mechanism (PMM) Tests durchgeführt (Bild 1). Die Aufbereitung der Messdaten sowie die Durchführung der Flachwasserversuche erfolgt im Jahr 2015.



Bild 1: Referenzschiff: Bau und Durchführung erster Schleppversuche

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Laufzeit des Forschungsvorhabens ist von 2010 bis Ende 2016 veranschlagt. Im verbleibenden Zeitraum sind folgende Forschungsaktivitäten vorgesehen:

Verschmelzung fahrdynamischer Modellverfahren der BAW mit den im ANS5000 enthaltenen Verfahren
Modellierung der Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße durch die Überführung der Ergebnisse aus dem Modellverfahren BoWave in die Strömungsdatenbasis des ANS5000 (Bis Ende 2015)
Erweiterung der Kollisionsmodelle des ANS5000, Modellierung von Gleitmolen (Bis Ende 2015)
Modellierung der Ansaugeffekte zum Ufer auf der Grundlage der Berechnungsergebnisse aus dem Verfahren BoWave und alternativ durch Erweiterung des Ansatzes von Abkowitz [siehe z. B. Brix, 1993]
Durchführung von CFD-Berechnungen (Feldmethoden) zur Kalibrierung einzelner Modellverfahren
Durchführung von physikalischen Schlepp- und PMM-Untersuchungen im flachen Wasser (Ende 2015)

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2016.

#### 5 Literatur

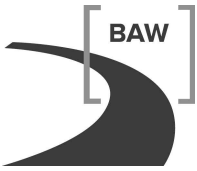
BAW (2005): Abschlussbericht zum FuE Projekt 8154 Einwirkung des Propellerstrahls auf die Gewässerberandung. BAW-Bericht, Karlsruhe

BAW (2014): Abschlussbericht zum FuE Projekt 8154 Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen. BAW-Bericht, Karlsruhe

Cap. Brix, J. (1993): Manoeuvring technical manual, Seehafenverlag Hamburg

Müller, S.-B.; Tenzer, M. (2009): Ruder- und Bugstrahlruderkräfte (Kurzbezeichnung); Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme (ISMT); Universität Duisburg-Essen, Bericht Nr.: F-007/2009

Schröter, A. (2007-2014): Numerische Modellierung schiffsinduzierter Wellen im regulären Projektbetrieb der BAW auf Basis der Boussinesq-Wellengleichungen, Untersuchungsabschnitt 1 bis 4, Bad Sachsa



SNAME (1988/1989): Principles of naval architecture; Band 1: Stability and strength; Band2: Resistance, propulsion and vibration; Band 3: Motions in waves and controllability  
Söding, H. (1986): Kräfte am Ruder; In: Handbuch der Werften XVIII, S. 47–57.

## **6 Veröffentlichungen**

-/-

**Integration mehrdimensionaler Modelle in die GBBSOft****Netzplan-Nr.:** A39530470004**Projektleiter/in:** S. Doychev, Prof. Dr. B. Söhngen, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W4)**E-Mail:** Svetlana.Doychev@baw.de**1 Problemdarstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die bestehende GBB-Software berechnet die schiffserzeugten Belastungen aus dem Primärwellenfeld, den Sekundärwellen und dem Schraubenstrahl. In Bezug auf die Schiffsform und die Schiffsgeschwindigkeit basieren die dafür entwickelten Algorithmen auf worst-case-Szenarien. Das Ergebnis liegt somit zwar immer auf der sicheren Seite, ist aber für spezielle Schiffstypen, z. B. mit schlanken Bug- und Heckformen, ungenau. Durch die Einbindung eines mehrdimensionalen Modells, das die Schiffsgometrie berücksichtigt und flexibel bezüglich der Schiffsgeschwindigkeit ist, wird ein genaueres und detailliertes Ergebnis erwartet. Ein weiterer Vorteil des mehrdimensionalen Modells besteht in der freien Vorgabe der Sohltopografie, was die Berechnung für Kanäle und Flüsse mit nichtregulären Querschnitten ermöglicht.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Gegenüber der aktuellen Version GBBSOft erlaubt das zweidimensionale Modell genauere Aussagen über die Wellenhöhen und Geschwindigkeiten, insbesondere bei der Fahrt in Gewässern mit einer kleinen Böschungneigung. Des Weiteren wird die Berechnung der Uferbelastungen in nichtregulären Kanal- und Flussquerschnitten möglich. Da die Bug- und Heckform eine entscheidende Rolle bei der Bildung des Wellensystems spielen, besteht ein zusätzlicher Vorteil des Modells darin, dass die Schiffsgometrie mit in die Berechnung einfließt. Der wirtschaftliche Nutzen der erweiterten Version besteht darin, dass mit genaueren Vorhersagen der Wellenhöhen und der Strömungsgeschwindigkeiten die erforderliche Steingröße nicht mehr überschätzt wird und somit die Materialkosten reduziert werden.

**1.3 Untersuchungsziel**

Es soll ein numerisches Programm erstellt werden, das in Abhängigkeit vom Kanalquerschnitt, von der Schiffsgometrie und der Schiffsgeschwindigkeit das Wellenbild eines stationär fahrenden Schiffes berechnet. Dabei werden der Grenzschichteinfluss am Schiff, der Sohlreibungswiderstand und die Schwimmbedingung am Schiff berücksichtigt. Das Endziel des Vorhabens ist eine neue Version der GBBSOft, die die Möglichkeit bietet, schiffserzeugte Wellen und deren Auf- und Rücklauf am Ufer auf einem handelsüblichen PC innerhalb weniger Minuten numerisch zu simulieren und daraus die schiffsinduzierten Uferbelastungen zu ermitteln.

**2 Untersuchungsmethoden**

Das Modell nutzt für die Wellenberechnung den potentialtheoretischen Ansatz, bei dem das Geschwindigkeitsfeld als Gradient eines Geschwindigkeitspotenzials dargestellt wird. In Übereinstimmung mit der Schlankkörpertheorie wird anstelle vom Schiff eine Verdrängungsrandbedingung gesetzt, die von der Schiffsgometrie und der Schiffsgeschwindigkeit abhängt, Chen, X.-N. (1999).

**3 Ergebnisse**

Seit 2013 wird das validierte Programm ShipWave in den Projektbetrieb einbezogen. In dem Projekt „Beurteilung der Ufersicherung an Wasserstraßen der Kategorie C“ wurde es am stärksten eingesetzt. Dazu wurde eine Reihe von Fallstudien für die typischen Kanalgeometrien sowie Schiffsabmessungen durchgeführt (siehe Bild 2). Die ersten Ergebnisse der Fallstudien wurden im Rahmen der Arbeitsbesprechungen im BMVBS sowie auf der Konferenz in Gent, Belgien („Third International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water“) vorgestellt.

Die Einbindung von ShipWave in GBBSOft konnte in 2014 abgeschlossen werden. Dies beinhaltete die Übergabe der Eingabedaten von der Benutzeroberfläche der GBBSOft, sowie die 3D-Darstellung der Ergebnisse von ShipWave in GBBSOft (siehe Bild 3). Das Einlesen und die Bearbeitung der unregelmäßigen Gewässerprofile waren in der ursprünglichen GBBSOft-Version nicht enthalten und musste deshalb konzipiert und ShipWave-konform eingebaut werden. Derzeit sind die beiden Programme in GBBSOft in dem Entwicklermodus zusammengeführt. Das Bild 1 zeigt die erweiterte Benutzeroberfläche der GBBSOft. Die ersten Tests der Version wurden erfolgreich durchgeführt.

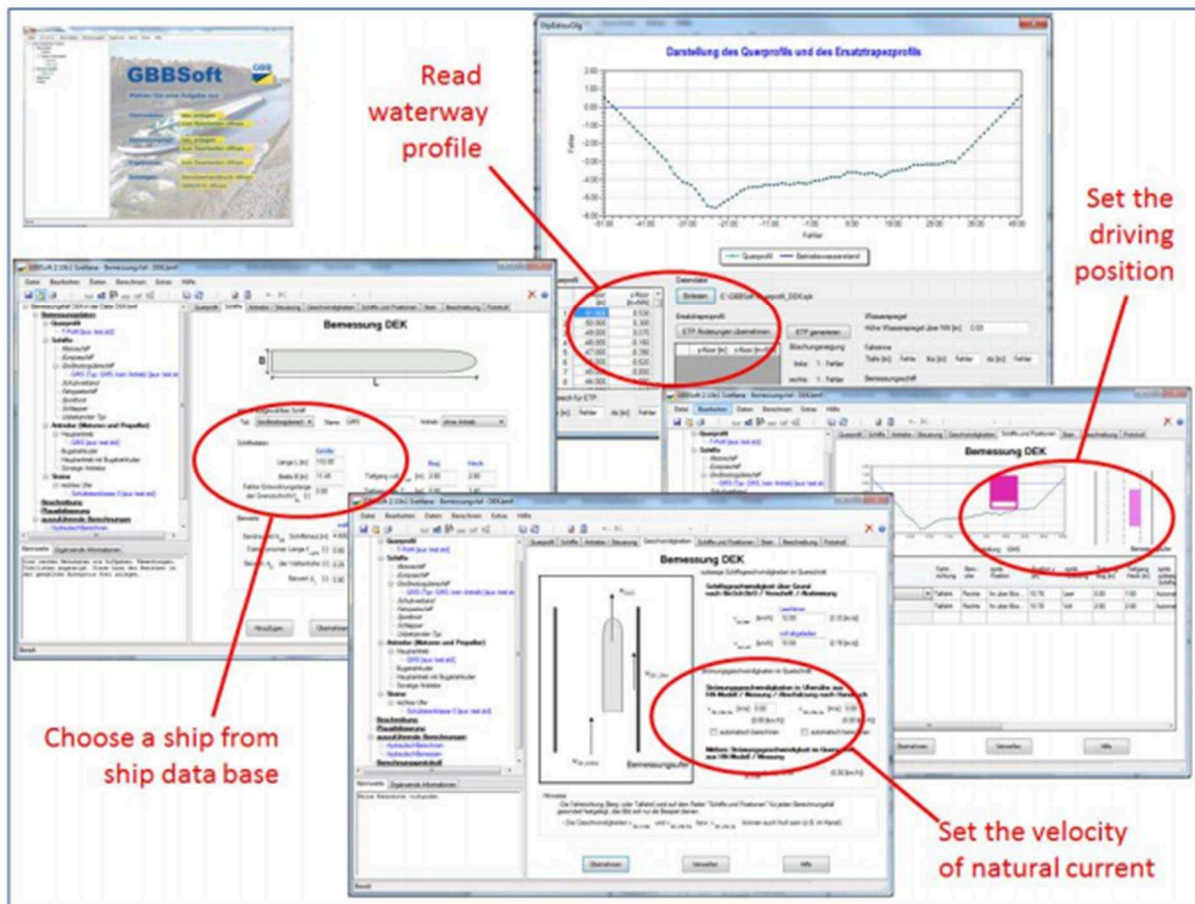


Bild 1: Die erweiterte Bedienoberfläche der GBBSOft

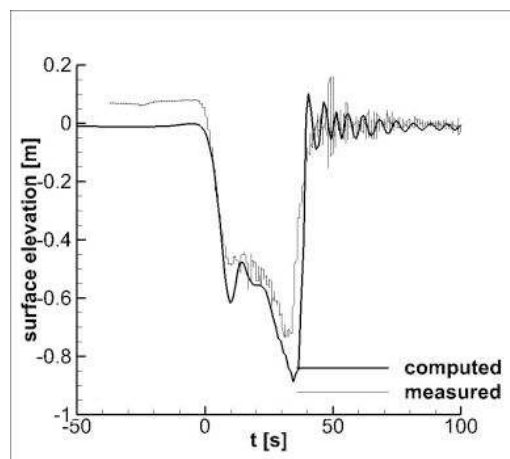
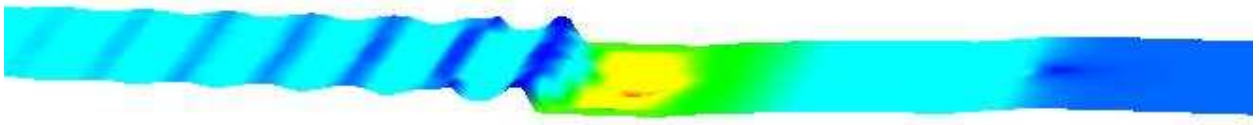
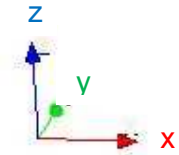


Bild 2: Vergleich der Berechnung von ShipWave mit einer Messung am Wesel-Datteln-Kanal für eine außermittige Fahrt mit 100% kritischer Schiffsgeschwindigkeit





*Bild 3: 3D-Darstellung des Berechnungsergebnisses von ShipWave in GBBSOft für den Küstenkanal. Dargestellt ist die Wasserspiegelauslenkung infolge einer Schifffahrt, gekennzeichnet durch die Primärwelle, Sekundärwellen sowie das fahrdynamische Einsinken (niedriger Wasserspiegel: rot, hoher Wasserspiegel: blau).*

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

In Zukunft soll das Programm ShipWave stärker in den Projektbetrieb sowohl als Stand-alone-tool als auch als Teil der GBBSOft miteinbezogen werden. Auch der Anwenderkreis soll kontinuierlich erweitert werden.

Während der ersten Phase der Einbindung sowie durch Diskussionen mit künftigen Anwendern ergeben sich zusätzliche Anforderungen an das Programm. Zum Beispiel sollen die Schiffe vom Benutzer durch die Wahl der Bug- und Heckform sowie die Vorgabe der Abmessungen definierbar sein. Dies erfordert einen tiefen Eingriff in den Quellcode, da die Gittererstellung stark an die Schiffslänge gekoppelt ist. Deshalb wurde das Projekt verlängert.

Arbeitsplan für das Jahr 2015:

- Erweiterung des Programms um die Möglichkeit der Erstellung der Schiffe beliebiger Abmessungen
- Weitere Tests der neuen GBBSOft-Version (GBBSOft+ShipWave). Bei Bedarf werden Anpassungen des Quellcodes vorgenommen
- Weitere Validierungstests, insbesondere zur Bewegung der Sportboote sind in Planung

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2016.

#### 5 Literatur

Chen, X.-N. (1999): Hydrodynamics of Wave-Making in Shallow Water. Dissertation. Universität Stuttgart. Shaker Verlag

#### 6 Veröffentlichungen

Doychev, S., Söhngen, B. (2013): Impact of ship size on induced waves and currents in confined waters. Third International Conference of Ship Maneuvering in Shallow and Confined Water. Gent, Belgien.

## **Untersuchungen zur Sohl- und Uferbeanspruchung aus Schlagflächenantrieben**

**Netzplan-Nr.:** A39530470005

**Projektleiter:** Prof. Dr.-Ing. B. Söhngen, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W4)

**E-Mail:** bernhard.soehngen@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Schiffspropeller verursachen insbesondere bei kleinen Flottwassertiefen große Sohlbeanspruchungen, die zu Auskolkungen bis hin zur Resuspension von Sohlmaterial führen können. Dies liegt u. a. an der Ausbreitungscharakteristik des drallbehäfteten Propellerstrahls, der eine große Erhaltungstendenz aufweist. Es stellt sich deshalb die Frage, ob es alternative Antriebssysteme von Binnenschiffen zu heute üblichen Schiffspropellern gibt, die bei gleichem Schub geringere Sohlbeanspruchungen verursachen und ggf. sogar günstigere Wirkungsgrade aufweisen, um Treibstoffkosten einzusparen. Eine mögliche alternative Antriebsform ist die Schlagfläche. Hierbei muss man sich eine auf- und ab bzw. seitwärts schwingende Fläche vorstellen wie bei der Schwanzflosse eines Delphins oder eines Fisches. Berechnungen und eine umfangreiche Literaturrecherche zeigen, dass Schlagflächenantriebe höhere Wirkungsgrade aufweisen können als herkömmliche Binnenschiffspropeller und voraussichtlich wesentlich geringere Sohlbelastungen verursachen. Diese Aussagen sollen im Rahmen des Vorhabens durch experimentelle Untersuchungen mit einem Schlagflächenroboter gestützt werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Durch den Einsatz von Schiffschrauben als Standardantrieb von Wasserfahrzeugen können Fundamente von Wasserbauwerken unterspült, Ufer beschädigt und Gewässerböden erodiert werden. Weiterhin leiden Pflanzen und Tier-Populationen in den Gewässern. Alternative Antriebe, wie z. B. Schlagflächenantriebe, können dazu beitragen, die propulsionsbedingten Belastungen zu begrenzen. Weiterhin könnten sie bekannte Nachteile von Schraubenantrieben reduzieren, die bei wechselnden Einsatzbedingungen wie unterschiedliche Wassertiefen, Strömungsgeschwindigkeiten, Beladungszustände, Fahrt als Einzelfahrzeug oder im Verband, Propellerwirkungsgrade aufweisen, die im Durchschnitt bei 0,3 – 0,5 liegen, obwohl theoretisch Werte bis etwa 0,6 erreichbar wären. Schlagflächenantriebe haben nach Literaturrecherchen diesbezüglich Vorteile, wenn die Hubbewegungen auf die Fahrtgeschwindigkeit adaptiert werden. Dies zeigen z. B. Untersuchungen u. a. von Anderson (1998) und eigene Ansätze auf Basis der Tragflügeltheorie, die Wirkungsgrade bis ca. 0,8 für erreichbar halten.

### **2 Untersuchungsziele**

Im Rahmen dieses Vorhabens werden experimentelle Untersuchungen zum Wirkungsgrad und zur Sohlbeanspruchung aus einem Schlagflächenantrieb durchgeführt. Die Ergebnisse der Modelluntersuchungen sollen in einen FuE-Antrag münden, mit dem externe Forschungsmittel erschlossen werden. Das BAW-FuE-Vorhaben dient der Vorbereitung dieses Antrags.

### **3 Untersuchungsmethoden**

Zur Durchführung der Experimente wurde am Institut für Wasserbau der Hochschule für Wirtschaft und Technik Karlsruhe mit Unterstützung des Ingenieurbüros Kauppert ein Versuchsstand aufgebaut. Die Versuche werden zur Ermittlung der Wirkungsgrade quasistationär durchgeführt, wobei das Antriebsorgan ortsfest installiert ist und von vorne angeströmt, so wie dies bei einer stationären Vorfahrt der Fall wäre. Die Strömungsgeschwindigkeit entspricht dabei der Schiffsgeschwindigkeit. Zur Beurteilung der Sohlbelastung, die im Stand bei Anfahr- oder Bremsvorgängen am größten ist, wurde der Schlagflächenroboter über einer Kiessohle stationär angebracht und im Sinne eines Anfahrvorgangs betrieben.

Der Schlagflächenantrieb besteht aus zwei Drehhebeln, die die Hub- (analog zum Schlagen einer Flosse) und Pitchbewegung (analog zur Drehung der Flosse während der Schlagbewegung) nachbilden, wobei die Schwingungsperiode  $T$ , die maximalen Hubbewegung ( $\Phi_{Hmax}$ ) und der Pitchwinkel ( $\Phi_{Pmax}$ ) sowie die Phasenverschiebung ( $\Psi$ ) zwischen Hub- und Pitchbewegung frei ansteuerbar sind. Am zweiten Hebel ist die Schlagfläche (Flosse) angebracht.

Die Flosse kann bis zu 0.3 m ins Wasser eintauchen. Dadurch kann das gesamte Spektrum denkbarer Streckungen der Schlagfläche variiert werden. Alle Drehkräfte und Drehgeschwindigkeiten sowie der Schub werden gemessen, sodass daraus der mechanische Wirkungsgrad als Verhältnis von Nutzu zu Gesamtleistung berechenbar wird. Die Messungen und Auswertungen werden im Rahmen von Hilfsassistententätigkeiten sowie Bachelor- und Studienarbeiten bei Prof. Eisenhauer mit Unterstützung, insbesondere hinsichtlich der Antriebs- und Messtechnik, durch die Fa. Kauppert, durchgeführt.

### 3 Ergebnisse

Der Schwerpunkt der Modellversuche im Jahre 2013 lag auf der Optimierung der Flossenbewegung für verschiedene hydraulische Randbedingungen (Eintauchtiefe der Flosse, Wassertiefe, Anströmgeschwindigkeit). Dabei konnten die Phasen mit negativem Schub minimiert werden. Dennoch ist insbesondere in den Umkehrpunkten der Bewegung ein negativer Schub unvermeidbar. Dennoch konnte ein sehr hoher Wirkungsgrad erreicht werden, wenngleich der erreichbare Schub insgesamt noch unbefriedigend war.

Im Jahre 2014 wurden die Versuche zur Wirkungsgradermittlung abgeschlossen. Es zeigte sich, im Einklang mit den Messungen von Anderson, dass der größte Wirkungsgrad bei Phasenverschiebungen zwischen Hub- und Pitchbewegung von etwa  $75^\circ$  und bei Hubgeschwindigkeiten, die in etwa der Anströmgeschwindigkeit entsprechen, erreicht werden kann. Der zugehörige maximale Pitchwinkel liegt bei etwa  $25^\circ$ . Die zugehörigen Wirkungsgrade lagen gleichfalls im Bereich der Theorie zwischen 0,5 und 0,8, im Mittel bei ca. 0,7. Bei höheren Reynoldszahlen, also im Naturmaßstab, sind für große Flügelstreckungen deshalb Werte um 0,8, wie sie auch Anderson erzielt hat, denkbar. Das wesentliche Ziel der Modellversuche, der Nachweis, dass hohe Wirkungsgrade tatsächlich in der Praxis erreichbar sind, wurde also erreicht.

Die Standversuche über einer Grobkiessohle (Korndurchmesser ca. 1,4 cm) wurden mit Einstellungen vorgenommen (max. Hubwinkel  $40^\circ$ , max. Pitchwinkel =  $40^\circ$ , Phasenverschiebung =  $75^\circ$ , Periode = 1,5 s, Wassertiefe = 0,29 m, Eintauchtiefe der Flosse = 0,22 m), die einen sehr großen Standschub, hier von ca. 16 N, ergaben. Dabei zeigte sich, dass selbst bei ca. 0,5 m/s max. Hubgeschwindigkeit und einem geringen Flottwasser (Abstand Flossenunterkante Kiessohle) von weniger als 7 cm nur geringe Bewegungen der Sohlkörner auftraten (siehe Bild 1). Dies kann nun wie folgt auf ein reales Binnenschiff übertragen werden, wobei eine Fahrsituation gewählt wird, wie sie häufig in Standard-Kanalprofilen vorkommt: Ein 2,8 m tief abgeladenes GMS über einer mit einem Deckwerk befestigten Sohle in einem Kanal mit 4,0 m Wassertiefe.

Dabei wird von einem Modellmaßstab von 1:16 ( $\lambda_L=16$ ) ausgegangen, der bei den gewählten Abmessungen der Modellflosse Pate stand, weil er die Möglichkeit eröffnet hätte, den Schlagflächenantrieb an einem Modellschiff z. B. des DST im gleichen Maßstab anzubringen. Die Eintauchtiefe der Flosse würde dann 3,5 m betragen, was nicht zur Wassertiefe von 4,0 m passt. Deshalb wurden die Ergebnisse des Modellversuchs nach Bild 1 zunächst auf eine geometrisch veränderte Flosse, die der Großausführung entspricht, umgerechnet, wobei jedoch die maßstäblich umgerechnete Flügeltiefe von 2,0 m beibehalten wurde. Der Auftriebsanstieg dieser Flosse mit etwas geringerer Streckung und etwas kleinerem Tiefgang- zu Wassertiefen-Verhältnis ist dann etwa 10 % kleiner als der der Modellflosse. Zusammen mit der unterschiedlichen Fläche errechnet sich bei Anwendung einschlägiger Modellgesetze (Kräfte  $\sim \lambda_L^3$ ) daraus ein Standschub von rund 50 KN, wie er für moderne Großmotorgüterschiffe in Anfahrtsituationen typisch ist. Die zugehörige Drehzahl eines angenommenen Düsenpropellers mit 1,6 m Durchmesser läge nach Berechnungen mit GBBSOft bei rund 73 % der üblichen Maximaldrehzahl von 360 Umdrehungen pro Minute und damit ziemlich genau bei dem von der EAU für Bemessungszwecke bei Anfahrtsituationen gewählten Wert von 75 %.

Hierzu errechnet sich mit GBBSOft gehört eine Strahlgeschwindigkeit am Düsenauslass von rund 5,4 m/s und bei Annahme eines fahrdynamischen Einsinkens von ca. 0,1 m eine Strahlgeschwindigkeit an der Gewässersohle von ca. 1,6 m/s, wonach Steine mit einem  $D_{50}$  von ca. 17 cm gerade nicht mehr erodiert würden. Die hier durchgeführten Modellversuche über einem Kiesbett mit  $D_{50} \approx 1,4$  cm, bei denen nur am Rand der Schüttung geringfügige Steinbewegungen auftraten, korrespondieren dagegen mit einem Steindurchmesser im Naturmaßstab von  $1,4 \cdot 16 = 22$  cm, der in etwa dem von LMB5/40 (20 cm) entspricht. Der Schwanzflossenantrieb wie er oben entworfen wurde und der in etwa den gleichen Standschub erzeugt wie ein üblicher Düsenpropeller, würde somit unter der Annahme, dass der Versuch den Bewegungsbeginn definiert, größere Steine erodieren als ein herkömmlicher Düsenpropeller! Die Sohlbelastungen eines solchen Schwanzflossenantriebes wären im hier betrachteten Beispiel also tatsächlich größer als die aus einem Standardpropeller. Dies ist ein nicht erwartetes Ergebnis.

Es ist aber davon auszugehen, dass der Antrieb eines GMS mit einer einzelnen Flosse aus Gründen der daraus folgenden, unangenehmen Querbewegung des Schiffes, sicherlich nicht akzeptiert würde. Vielmehr würde man 2 gegeneinander schlagende Flossen realisieren, wenn nicht eine horizontal liegende Flosse wie bei einem Wal zur Anwendung käme. Jede der beiden Flossen hätte dann nur den halben Schub aufzubringen, wobei hierfür die Periode der Schlagbewegung um den Faktor  $\sqrt{2}$  vergrößert werden müsste. Dies folgt aus der Proportionalität der Schubkraft zum Quadrat der Schlaggeschwindigkeit, die wieder, bei gleichem Hub, umgekehrt proportional zur Periode ist. Entsprechend würde sich die Schlaggeschwindigkeit um den Faktor  $1/\sqrt{2}$  reduzieren.

Da nun der Grenzwert des gerade noch stabilen Steindurchmessers mit der Geschwindigkeit im Quadrat ansteigt, halbiert sich bei 2 Flossen, die den gleichen Gesamtschub ergeben, der Grenzwert des Steindurchmessers gleichfalls auf die Hälfte. Er läge dann bei ca. 0,11 m und wäre damit kleiner als der Wert, der sich aus einem Düsenpropeller ergibt. Hieraus kann geschlossen werden, dass ein Schlagflächenantrieb, der unter üblichen Betriebsbedingungen für ein GMS ausgelegt würde, nicht generell eine reduzierte Sohlbelastung erzeugt als der aus einem Propeller, dass dies aber konstruktiv erreichbar ist. Damit wurde am Beispiel auch das 2. wesentliche Ziel des FuE-Vorhabens erreicht, einzuschätzen, ob und in welchem Umfang Schlagflächenantriebe geringere Sohlbelastungen als Schraubenantriebe erzeugen.



*Bild 1: Schlagende Flosse über einer Lockersedimentsohle, die im Modellmaßstab einer Sohl-sicherung aus LMB 5/40 entspricht.*

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Die ursprünglich vorgesehenen Freifahrversuche erscheinen nach Bewertung aller vorliegenden Ergebnisse nicht mehr erforderlich zu sein. Deshalb wird nach Vorlage des Abschlussberichtes, der vom maßgeblich bearbeitenden Hilfsassistenten im Ingenieurbüro Kauppert angefertigt wurde, das BAW-Forschungs-Vorhaben abgeschlossen und Kontakt mit dem Bionik-Labor der Hochschule für Wirtschaft und Technik, Karlsruhe aufgenommen (Prof. Dr.-Ing. Ramon Estaña) Es wurde beschlossen einen gemeinsamen Forschungsantrag zu stellen.

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2015.

#### **5 Literatur**

- Neil Bose (2009): Marine Powering Prediction and Propulsors. Society of Naval Architects.  
Iosilevskii, G., Weihsdoi, D.(2008): Speed limits on swimming of fishes and cetaceans. J. R. Soc. Interface Vol 5.  
Anderson, J. M., Streitlien, K., Barrett, D. S., Triantafyllou, M. S. (1998): Oscillating foils of high propulsive efficiency. J. Fluid Mech.,Vol 360.  
Weiler, C. (2012): Der Schwanzflossenantrieb als alternativer Antrieb von Booten. Bachelor-Thesis, Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft.

#### **6 Veröffentlichungen**

- Kauppert, Schanz, Zlatanov (2015): Schlagflächenantriebe – Effizienz und Sohlbeanspruchung. Bericht des Ing.Büro Kauppert. März 2015

## **Numerische Modellierung von Transportkörpern (Dünen) in Binnenwasserstraßen**

**Netzplan-Nr.:** A39530570001

**Projektleiterin:** A. Goll, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Numerische Verfahren im Wasserbau (W5)

**E-Mail:** annalena.goll@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Form des Gewässerbodens bestimmt nicht nur den hydraulischen Widerstand, Sedimenttransport, Morphodynamik und die Habitatentwicklung. Sie stellt die Schifffahrt mitunter vor große Probleme: Obwohl sowohl Sedimentcharakteristiken, Flussgeometrie und Abfluss bekannt sind, lässt sich der zu erwartende Sedimenttransport und damit die Wassertiefe nur ungenau bestimmen. Die Entwicklung von Transportkörpern wie Dünen und Bänken trägt hierbei eine nicht unerhebliche Teilschuld. Die Entwicklung von Transportkörpern wie Dünen und Bänken trägt hierbei eine nicht unerhebliche Teilschuld. Die Wassertiefen der Schifffahrtsstraßen genau zu prognostizieren bzw. zu beeinflussen ist also unverzichtbar. Dies ist einer der Gründe, warum in der Literatur Dünen als wichtigste Sohlform in der praktischen Ingenieurstätigkeit bezeichnet werden.

Zumeist wird in der numerischen Modellierung mittels geschätzter oder gemessener Dünenlänge und -höhe eine angepasste Sohlrauheit berechnet, welche den Einfluss der Transportkörper auf die Strömung abbilden soll. Die Sohlrauheit kann z. B. kumulativ aus der Kornrauheit und der Formrauheit von Riffeln und Dünen berechnet werden. Damit wird eine globale Anpassung der Sohlrauheit vorgenommen. Der sich zeitlich und örtlich ändernden Geometrie der Dünen wird damit gar nicht oder nur ungenügend Rechnung getragen.

Verschiedene jüngere Publikationen berichten von der expliziten Modellierung von Dünen, z. B. Rüther et al. (2008) und Nabi (2010). Dabei kommen dreidimensionale RANS-Modelle oder auch LES-Modelle zum Einsatz. In verschiedenen Publikationen (Goll & Kopmann, 2012, Goll et al., 2013a+b) konnte gezeigt werden, dass es prinzipiell mit dem in der BAW eingesetzten dreidimensionalen Feststofftransportmodell (FT-Modell) Telemac / Sisyphé möglich ist, die Dünenentstehung und ihre Propagation zu simulieren.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Eine wesentliche Aufgabe der Abteilung ist die möglichst genaue Berechnung und Vorhersage der morphologischen Entwicklungen infolge von Bau-, Regelungs-, Instandhaltungs- und Geschiebewirtschaftungsmaßnahmen an Bundeswasserstraßen für die Beratung der planenden und ausführenden Instanzen der WSV. Eine kontinuierliche Verbesserung der in der BAW eingesetzten Modelle führt zu einer steten Optimierung und einem erweiterten Anwendungsspektrum der Modelle für die Projektarbeit. Langfristig sollen mit Hilfe von numerischen Modellen Dünenänderungen infolge von baulichen oder geschiebewirtschaftlichen Änderungen an den Wasserstraßen prognostiziert werden können. Diese Ergebnisse sind entscheidend für eine möglichst genaue Prognose und Beeinflussung der Wassertiefen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, die Möglichkeiten der numerischen Modellierung von Transportkörpern / Dünen mittels FT-Modell zu untersuchen. Ausgehend von der These, dass Dünen mit numerischen dreidimensionalen Verfahren direkt (also nicht mit Hilfe von Parametrisierungen) simuliert werden können, sollen die Möglichkeiten und Grenzen zur Dünenprognose mit Hilfe dieser Verfahren abgesteckt werden. Die Validierung der Ergebnisse soll an Messergebnissen aus in der BAW laufenden Rinnenversuchen mit Dünen erfolgen. Die Anwendung der Dünenprognose soll dann an realen Flussmodellen geprüft und ggf. auf die Projektarbeit übertragen werden.

## 2 Untersuchungsmethoden

Da die Physik der Dünen noch nicht vollständig verstanden ist, sind vergleichende Untersuchungen im Labor unabdingbar. In einer Laborrinne („blaue Rinne“) der BAW finden Untersuchungsreihen zu Dünen statt. Dabei handelt es sich um Versuche mit bewegter Sohle und verschiedenen Einbauten, und um rein hydraulische Messungen über natürlich geformten, fixierten, unbeweglichen Dünen. Numerisch begleitet können durch diese Experimente sowohl hydrodynamische als auch morphodynamische Modelle validiert werden.

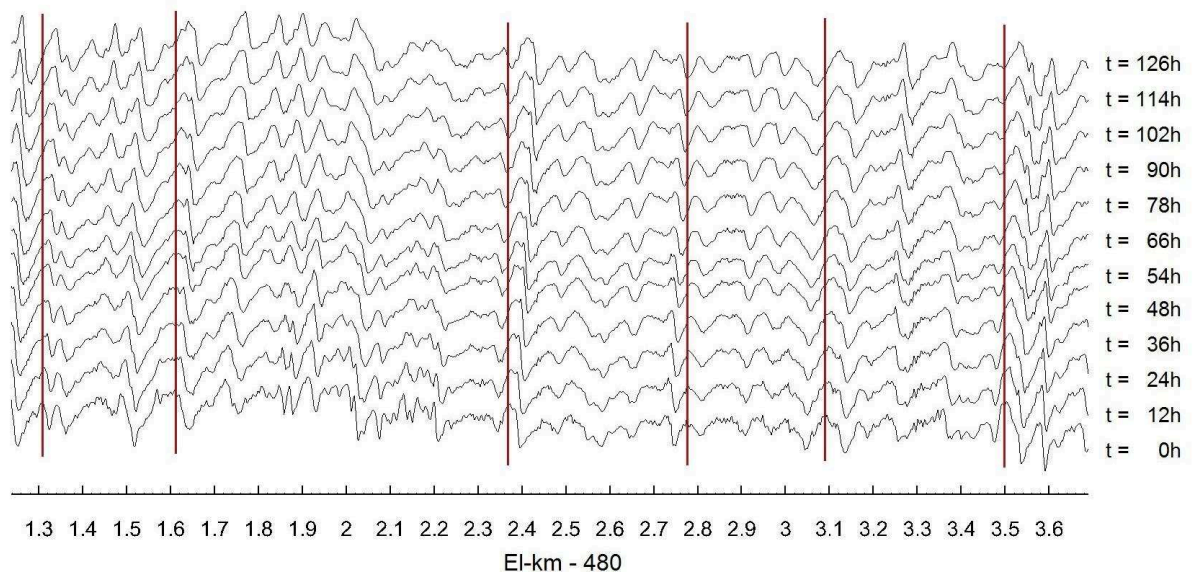
Für die explizite Modellierung von Dünen mittels FT-Modell müssen zunächst die Parameter detektiert werden die Dünenentstehung, Dünenhöhe und Dünenlänge bestimmen. Die Wirkung dieser Parameter muss systematisch untersucht und verstanden werden. Ggf. sind weitere Ansätze zu implementieren und zu testen (z. B. gravitationeller Transport, Turbulenzmodellierung, nicht-hydrostatischer Druckansatz). Da Dünen eine sehr komplexe Hydrodynamik erzeugen, spielen die Auflösung des Gitternetzes sowohl horizontal als auch vertikal, sowie die Turbulenz eine große Rolle. Diesem Umstand sind durch die Wahl von verschiedenen Turbulenzmodellen sowie durch unterschiedliche räumliche und zeitliche Auflösungen bis hin zu LES-Simulationen Rechnung zu tragen. Die Messungen über der fixierten Dünensohle bieten hier eine sehr gute Datengrundlage zur Validierung.

Zum Einsatz kommt das Verfahren Telemac / Sisyphe der EDF (Software), da diese Open-Source-Software eine exzellentes Morphodynamik-Modul beinhaltet.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen in einem projektrelevanten Anwendungsfall eingesetzt werden. Wenn möglich, soll dabei eine direkte Dünenmodellierung durchgeführt werden. Andernfalls sind Parametrisierungen abzuleiten, die eine verbesserte Berücksichtigung von Dünen ermöglichen.

## 3 Ergebnisse

Die aktuellen Ergebnisse wurden im Oktober des Jahres 2014 auf der Telemac-Mascaret User Conference in Grenoble (Goll, 2014a), sowie während des Kolloquiums „Herausforderung Sedimenttransport – Methoden und Konzepte im Flussbau“ im November in der BAW Karlsruhe (Goll, 2014b) präsentiert.



**Bild 1:** Längsschnitte durch die Flusssohle der Elbe (El-km 480-484, ein Ausschnitt von 2,3 km ist dargestellt, Überhöhungsfaktor von  $7,6 \cdot 10^3$ ). Der Fortschritt der Dünen wird anhand der roten, vertikalen Linien deutlich.

Hier konnte gezeigt werden, dass auch in Flussmodellen ein explizites Modellieren von Dünen und ihren Bewegungen mit Telemac3D und Sisyphé möglich ist. In bisherigen Veröffentlichungen wurden vorrangig numerische Simulationen von Versuchsrinnen präsentiert (Goll et al. 2013a+b). Die neuesten Ergebnisse zeigen die Simulation der Dünenbewegung auf Fließgewässerskala (das Modell hat eine Länge von 4 km, eine Erweiterung des Simulationsgebiets ist angestrebt). In einer Simulation über mehr als 5 Tage bewegten sich die Dünen entlang der Sohle des Fließgewässers, wobei sie ihre Form und Ausprägung beibehielten (Bild 1). Die Fortschrittsgeschwindigkeit der Dünen in dem untersuchten Flussabschnitt liegt bei durchschnittlich 10 m/d. Diese Geschwindigkeit wird vom Modell sehr gut abgebildet: hier bewegen sich die Dünen 50 bis 60 m über den Simulationszeitraum von 126 h (zu erkennen an den vertikalen, roten Linien in Bild 1).

Entscheidend für eine erfolgreiche Dünensimulation ist die Reproduktion der turbulenten Strömungsparameter – diese sind für Dünenbildung und -transport essentiell. In den RANS-Simulationen dieses FuE-Projekts wird diesem Umstand mittels Zwei-Gleichungs-Turbulenzmodellen ( $k$ - $\epsilon$ -Modell) Rechnung getragen. Für komplexe morphologische Fragestellung, welche dreidimensional Transportvorgänge beinhalten, müssen dreidimensionale Strömungsmodelle zum Einsatz kommen, da nur so den Strömungsverhältnissen in Bodennähe, und damit den zugehörigen Sohlschubspannungen, Rechnung getragen werden kann.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

bis Juni 2015

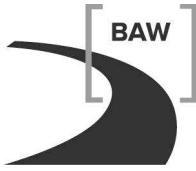
- Systematische Untersuchung der für die Dünenentstehung, Dünenhöhe und Dünenlänge relevanten Parameter. Vergleich von unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Auflösung
- Anwendung und ggf. Erweiterung oder Ergänzung von Ansätzen zur Berechnung des gravitativen Transports / der Schubspannung / der Turbulenz
- Validierung der Hydrodynamik/Turbulenzberechnung anhand von natürlich geformten Dünen aus dem Laborexperiment
- Ggf. Einbindung von Turbulenzparametern in den Geschiebetransport, Parametrisierung des Dünentransport für Übertrag in Flussgebietskala
- Projektrelevanter Anwendungsfall
- Abschlussbericht, ggf. Promotionsarbeit

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis Juni 2015.

#### 5 Literatur

- Apsley, D. D., Stansby, P. K. (2008): Bed-load sediment transport on large slopes: Model formulation and implementation within a RANS solver. *Journal of Hydraulic Engineering*, Heft 134, S. 1440-1451.
- Goll, A., Kopmann, R. (2012): Numerical simulations of groyne influenced dunes. *Proceedings of River Flow 2012*, San José, Costa Rica. CRC Press.
- Goll, A., Kopmann, R., Villaret, C. (2013): Numerical Modelling of flumes with moving dunes – TELEMAC3D and Sisyphé. *Proceedings of Marine and River Dune Dynamics – MARID IV*, 15. & 16. April, Bruges, Belgium. VLIZ Special Publication 65.
- Goll, A., Kopmann, R., Baron, M. (2013): Kontinuierliche Validierung hydrodynamischer und morphodynamischer Modelle mit physikalischen Modellversuchen. *Wasserwirtschaft*, Ausgabe 12/2013, S. 28-33, Springer Verlag.
- Nabi, M. (2010): Computational modelling of three dimensional bedform evolution. *Proceedings of River Flow 2010*, TU Braunschweig.
- Ruether, N., Olsen, N., Eilertsen, R. (2008): 3D modeling of flow and sediment transport over natural dunes. *Proceedings of 4th International Conference on Fluvial Hydraulics*, River Flow 2008, Cesme/ Izmir, Turkey.
- Yang, S.-Q., Lim, S.-Y. (2003): Total load transport formula for flow in alluvial channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, Heft 129, S. 68-72.





## 6 Veröffentlichungen

Goll, A., (2014): Direct Simulation of Bed Forms of the River Elbe, Germany. Proceedings of the 21th Telemac-Mascaret User Conference, 15-17 October 2014, Grenoble.

Goll, A., (2014): Numerische Simulation von Dünen. Kolloquium Herausforderung Sedimenttransport – Methoden und Konzepte im Flussbau, 26. November 2014, BAW, Karlsruhe.

## Evaluierung und Adaptierung der SPH-Methode für wasserbauliche Fragestellungen an Bundeswasserstraßen

**Netzplan-Nr.:** A39530570002

**Projektleiter:** J. A. Jankowski, E. Rustico, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Numerische Verfahren im Wasserbau (W5)

**E-Mail:** jacek.jankowski@baw.de, eugenio.rustico@baw.de

### 1 Problemdarstellung und Ziel

#### 1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die in den Abteilungen W und K derzeit sowohl in ingenieurpraktischen, als auch Forschungsprojekten verwendeten numerischen Verfahren für die Strömungssimulation sind ausschließlich netzbasiert. In diesen konventionellen Verfahren, die üblicherweise mit den Finite-Elementen-, -Differenzen- und -Volumen-Methoden (FEM, FDM, FVM) aufgebaut sind, wird abgesehen von der teilweise in der Advektion verwendeten Lagrange'schen Methode der Charakteristiken ausnahmslos die Euler'sche Betrachtung des zu modellierenden Fluids angenommen.

Obwohl äußerst erfolgreich, haben diese netzbasierten Verfahren gewisse Anwendbarkeitsgrenzen, an die man sich nur ausnahmsweise und oft mit klaren Verlusten an der rechnerischen Effizienz nähern kann. Hiermit sind Strömungen gemeint, die charakterisiert sind durch größere geometrische Deformationen bzw. stärkere Schubspannungen an Kontaktflächen zwischen der sich in Bewegung befindenden physikalischen Phasen (wie Wasser, Luft, Feststoffe), bzw. diesen Phasen und beweglichen Objekten, oder durch eine stärkere, sich dynamisch verändernde Vermischung. Dazu zählen verschiedene Strömungsprozesse, die relevant für wasserbauliche Fragestellungen sind (Kapitel 1.2).

SPH, *Smoothed Particle Hydrodynamics*, ist eine alternative Methode zur Modellierung dieser o. g. Strömungen, die mit konventionellen – netzbasierten – numerischen Methoden schwer zu erfassen sind. Sie basiert auf der konsequent angewendeten Lagrange'schen Form der Betrachtung der Gleichungen der Strömungsmechanik (Violeau 2012). Im Gegensatz zu Netzmethode werden die physikalischen Eigenschaften des Fluids Partikeln und nicht fixierten Punkten im Raum zugeordnet. Es wird kein Netz benötigt, um diese Eigenschaften zu interpolieren bzw. Operatoren der Gleichungen zu formulieren: Das Fluid wird durch eine endliche Anzahl makro- oder mesoskopischer (im Sinne der Mechanik des Kontinuums) Objekte abgebildet. Diese Objekte haben eine konstante Masse und ein gegebenes Volumen, das genügend klein ist, um annähernd als miteinander wechselwirkende Fluidpartikel betrachtet zu werden. Die Genauigkeit des Verfahrens hängt dann wesentlich von Partikel-dichte also der Partikelanzahl ab.

Obwohl die mathematische Theorie komplex und die Begriffe abstrakt sind, zeichnen sich die resultierenden numerischen Codes durch elegante Geradlinigkeit aus. Der rechnerische Aufwand in SPH-Codes wird durch die Komplexität der Kernelfunktionen, den Suchalgorithmus für die Nachbarpartikel und die Begrenzung der Zeitschrittlänge bestimmt. Insbesondere diese letzte Limitierung ist für die SPH-Methode besonders kritisch: Um die Inkompressibilität der Strömung korrekt wiederzugeben, muss zur Einhaltung von Stabilitätskriterien die Zeitschrittlänge umgekehrt proportional zu der (sehr großen) Schallgeschwindigkeit im gegebenen Fluid sein, was theoretisch zu sehr kleinen Zeitschritten zwingt. Dies kann als größter Nachteil des SPH-Verfahrens für die Anwendung mit längeren Zeitskalen der zu reproduzierenden Prozesse aufgefasst werden. Wegen der algorithmischen Geradlinigkeit und der resultierenden einfachen Datenstrukturen ist diese Methode jedoch für massive Parallelisierung besonders geeignet. In den letzten Jahren erlaubt die Verfügbarkeit preisgünstiger paralleler Hardware sowohl die Überwindung des rechnerischen Aufwands aufgrund der Limitierung durch die Zeitschrittweite, als auch die Steigerung der Qualität der Simulation durch Verwendung von größeren Partikelzahlen (Rustico 2012).

#### 1.2 Bedeutung für die WSV

Bei Steigerung der rechnerischen Effizienz eröffnet die SPH-Methode (Smoothed Particle Hydrodynamics) neue Möglichkeiten bei der Bearbeitung von wasserbaulichen Fragestellungen, bei denen

die traditionellen netzbasierten Methoden an ihre Anwendbarkeitsgrenzen stoßen. Insbesondere Strömungen mit folgenden Eigenschaften sind von Interesse: größere Deformationen der freien Oberfläche (z. B. brechende Wellen und deren Einfluss auf wasserbauliche Strukturen), Übergänge zwischen schießenden und strömenden Strömungszuständen (Wehre, überflutete Dämme und Buhnen), Kräfte auf schwimmende Objekte (Schleusungsvorgang), turbulente Strömungen bei komplizierten Geometrien (Fischpässe), Bodenfracht, Erosion (Kolkung), bewegliche Bodenformen, suspendierte Sedimente und deren Aufwirbelung, Multiphasen-Strömungen (Eisgang) etc.

### 1.3 Untersuchungsziel

Im Rahmen des Projektes soll ein existierender SPH-Code (GPUSPH) (Hérault et al. 2010, 2011) für die Berechnungen mit neuen Rechnerarchitekturen (GPU-Nutzung) weiter optimiert werden, so dass eine Evaluierung und Adaptierung der SPH-Methode für die ausgewählten, spezifischen wasserbaulichen Probleme an den Wasserstraßen möglich ist. Als erste Testanwendungen werden Fischpässe, Wehre und Schleusen gewählt. Ggf. kommt eine Erweiterung hinsichtlich des Sedimenttransports in kleineren Zeitskalen in Betracht. Am Ende des Projekts soll ein neues Modellierungssystem zur Verfügung stehen, das man einerseits in der täglichen Projektarbeit anwenden und andererseits weiter im Hause entwickeln kann.

## 2 Untersuchungsmethoden

Die ausgewählten Anwendungen sollen die Anwendbarkeit der SPH-Methode und der entwickelten Software-Umgebung zur Bewältigung ingenieurpraktischer Probleme an Wasserstraßen demonstrieren. Hiermit sind Vergleiche mit den Resultaten von Laboruntersuchungen und numerischen Simulationen unter Mitwirkung der Referate W1, W3 und W4 notwendig.

Die ersten Entwicklungsarbeiten erfolgten zuerst auf einem mit einer für numerische Berechnungen geeigneten leistungsfähigen GPU-Karte ausgestatteten PC. Seit Mitte 2013 stehen 8 Knoten mit je zwei Nvidia Tesla K20M als Erweiterung des Compute-Servers der Abteilung W zur Verfügung, was Arbeiten an der Multi-GPU-Multi-Node Version des Codes erlaubt. Programmierarbeiten erfolgen weitgehend mit Open Source bzw. frei zur Verfügung stehenden (Nvidia CUDA) Entwicklungswerkzeugen. Es wird ein gemeinsames Code-Repository (git) für alle Konsortium-Mitglieder organisiert und verwaltet. Alle Entwicklungen bleiben Open Source unter der GPL-Lizenz.

Die Arbeiten erfolgen im Rahmen eines internationalen Konsortiums (ATHOS). Die Arbeit im Konsortium erfordert die Teilnahme an halbjährlichen Treffen, in denen die Richtung der weiteren Forschung bestimmt wird und die zu erledigenden Arbeiten samt der zur Verfügung stehenden Mitteln definiert werden. Es werden regelmäßige Arbeitstreffen organisiert. Die relevanten Ergebnisse der Arbeit werden publiziert, wobei der jährliche SPHERic Workshop als wichtigste Plattform für die Kommunikation bevorzugt wird.

## 3 Ergebnisse

Im zweiten Jahr des Vorhabens (2014) wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Optimierung und Korrekturen am *multi-device* Code (*multi-GPU*, *multi-node*). Dies betraf die Defragmentierung der Transfers zwischen Geräten, Implementierung von asynchroner Kommunikation (zeitlich überlappend mit der Berechnung) und von GPUDirect für MPI-Simulationen. Es wurden Performance-Zähler für *multi-device*-Berechnungen eingeführt. Vorbereitungen für detailliertes Profiling des Verfahrens.
- Wesentliche Veränderungen und Verfeinerungen an Testfällen „Fischpass“ und „Schleuse“. Zahlreiche Testläufe mit existierenden und neueren Features (kompakte Nachbarschaftsliste, homogene Präzision der Berechnung, Lennard-Jones-Berandungen, pseudo-Einläufe, schwimmende Objekte). Formulierung von Schlussfolgerungen für Verbesserungen und Weiterentwicklungen, insbesondere an der Vorgabe von offenen Rändern (Einläufe).
- Erweiterung von semi-analytisch formulierten Rändern für *multi-device*-Anwendungen: Behandlung der partitionierten Netzkonnektivität; Partikel-Kreation und -Destruction bei offenen Rändern, Teilung der Ränder zwischen Bereichen, die verschiedenen Geräten zugeordnet sind.

- Verbesserungen an einigen Aspekten der Modellierung der im Fluid frei treibenden (schwimmenden) Objekte, die mit semi-analytischen Berandungen (vernetzt) für *multi-device* Berechnungen dargestellt werden. Dies beinhaltet Kollisionen zwischen den Objekten und bessere Berücksichtigung der Trägheitskräfte (Bild 1).
- Design und fortlaufende Implementierung von einem neuen auf Dateien basierten Interface für die generische Problemdefinition (Arbeitsname *XProblem*) für schnellere und bequemere Erstellung von spezifischen Modellierungen.
- Aktive Teilnahme an mehreren Arbeitsreffen mit anderen Mitgliedern des ATHOS Konsortium, auch gemeinsame Programmierarbeiten. In diesem Rahmen wurde das Arbeitsprogramm laufend auf die Entwicklungen der Beteiligten angepasst. Dazu sollen insbesondere die Entwicklungen an semi-analytischen Berandungen von Arno Mayrhofer (BOKU Wien) erwähnt werden. Über die Fortschritte der Arbeit wurde intern systematisch berichtet.
- Teilnahme an Konferenzen (siehe Veröffentlichungen).

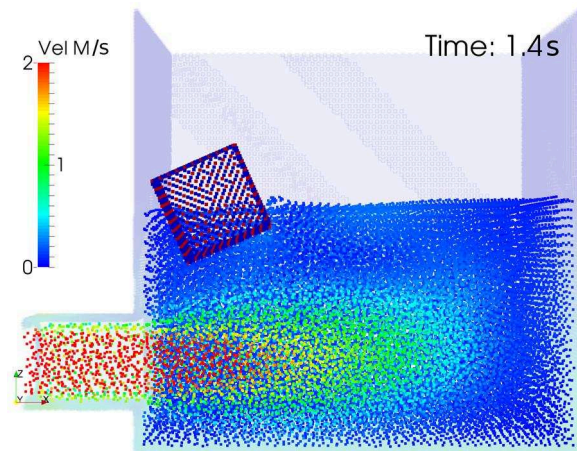


Bild 1: Vorstudie für einen Schleusungsvorgang mit einem Schiff in der Schleuse mit div. Typen von Randbedingungen

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

**2015:** Das Arbeitsprogramm für 2015 beinhaltet vor allem die Simulation der Beispiele „Fischpass“ und „Schleuse“ unter Anwendung der neu entwickelten Erweiterungen des Verfahrens, insbesondere der Vorgabe von Randbedingungen und der Berücksichtigung schwebender Objekte. Am Ende dieses Bearbeitungsjahres soll ein neues Modellierungssystem zur Verfügung stehen, das man in der täglichen Projektarbeit anwenden kann. Dazu soll die vollständige Bearbeitungskette einer praktischen Problemlösung auf generische Weise mit einem auf Dateien basierenden Interface berücksichtigt werden. Weiterhin soll eine abschließende Bewertung des Verfahrens erfolgen und das weitere Vorgehen formuliert werden. Falls Entwicklungen anderer Mitglieder des Konsortiums es erlauben, könnten in Zukunft Erweiterungen des Modells für den Sedimenttransport (Bodenfracht, Suspension, Erosion) berücksichtigt werden. Die Dokumentation und Veröffentlichung der Ergebnisse wird vervollständigt.

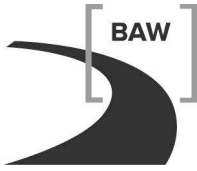
Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2015.

#### 5 Literatur

- Violeau, D. (2012): Fluid Mechanics and the SPH Method: Theory and Applications, Oxford University Press, 640p.
- Héroult, A., Bilotta, G., Darlymple, R.A. (2010): SPH on GPU with CUDA. Journal of Hydraulic Research, 48:S1, 74-79.
- Héroult A, Bilotta G, Darlymple, R.A. (2011): GPUSPH Users Manual, August 1, 2011.
- Rustico, E. (2012): Fluid dynamics simulations on multi-GPU systems. PhD thesis, Università degli Studi di Catania, Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali.

#### 6 Veröffentlichungen

- Rustico, E., Bilotta, G., Héroult, A., Del Negro, C., Gallo, G. (2014): Advances in Multi-GPU Smoothed Particle Hydrodynamics applications. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 25(1) 43-52.
- Rustico, E., Brudy-Zippelius, T., Héroult, A., Bilotta, G. (2014): Modelling the Holtenau ship lock with SPH, 11th International Conference on Hydroscience & Engineering, 2014, Hamburg.



- Rustico, E., Jankowski, J., Hérault, A., Bilotta, G., Del Negro, C. (2014): Multi-GPU, multi-node SPH implementation with arbitrary domain decomposition, 9th SPHERIC International Workshop, 2014, Paris.
- Farahani, R.J., Dalrymple, R.A., Hérault, A., Bilotta, G., Rustico, E. (2014): Modeling the Coherent Vortices in Breaking Waves, 9th SPHERIC International Workshop, 2014, Paris.
- Rustico, E., Sokoray-Varga, B., Bilotta, G., Hérault, A., Brudy-Zippelius, T. (2014): Full 3D numerical simulation and validation of a fish pass with GPUSPH, ECMI 2014 - The 18th European Conference on Mathematics for Industry, 2014, Taormina, Italy.

## **Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiffahrtsstraße - Schiffsdynamik**

**Netzplan-Nr.:** A39550210055

**Projektleiter:** Dr.-Ing. K. Uliczka, Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)

**Bearbeiterin:** Dipl.-Ing. (FH) H. Jansch, Referat Ästuarsysteme I (K2)

**E-Mail:** klemens.uliczka@baw.de; hanne.jansch@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiffahrtsstraße (WSS) erfordert aufgrund der Größenentwicklung der Seeschiffe und der daraus notwendigen Befahrbarkeitsanalyse der Tideästuar fortlaufende Forschungsanstrengungen auf den Gebieten der schiffserzeugten Belastungen, der Schiffsdynamik und der Schiffsführungssimulation.

Dieses Forschungsgebiet wird in drei verschiedenen Teilprojekten bearbeitet, deren Schwerpunkte zum einen auf der Schiffsdynamik (u. a. Squat, Trimm, Bank-Effekt), zum anderen auf der Weiterentwicklung mathematischer Verfahren zur Wechselwirkung Seeschiff/Seeschiffahrtsstraße sowie auf der Entwicklung der Schiffsführungssimulation für die Belange der WSV liegen. Das aus dem Forschungsprojekt WSS entwickelte Teilprojekt Schiffsdynamik erarbeitet u. a. Basisdaten zum fahrdynamischen Verhalten sehr großer Containerschiffe bei Revierfahrt (z. B. Squat, Trimm) sowie zur Wechselwirkung dieser großen Fahrzeuge mit verschiedenen Uferböschungen (z. B. abstands- und von der Böschungsneigung abhängige Querkräfte und Giermomente infolge des Bank-Effekts). Die jeweils parallel mit zu erfassenden schiffserzeugten Wasserspiegelauslenkungen (Schiffswellen) und Strömungen ermöglichen eine ganzheitliche Betrachtung der physikalischen Prozesse bei der Revierfahrt eines großen Fahrzeugs.

Abgesicherte, quantitative Prognosen des dynamischen Fahrverhaltens (Squat und Trimm) im seitlich begrenzten, extremen Flachwasser sind mit der Methode des hydraulischen Modellversuchs in einem fachlich hinreichenden Maßstab gewährleistet. Des Weiteren sind derzeit für eine abgesicherte Bearbeitung der Aufgabenstellung validierte und international anerkannte hydrodynamisch-numerische RANSE-Verfahren als annähernd gleichwertig zum Modellversuch anzusehen.

Die Weiterentwicklung potentialtheoretischer Verfahren im Auftrag der BAW für die Belange der WSV zeigte bei engen Seeschiffahrtsstraßen wie z. B. dem NOK die Grenzen der Einsatzmöglichkeiten dieser Verfahren auf, so dass nach intensiver Fachdiskussion vorerst die Methodenentwicklung sowohl zur Erfassung weiterer Validierungsdaten in der Natur als auch Verfahren zur Qualitätssicherung der Daten Dritter durch die BAW als vordringliche Entwicklungsarbeit erachtet wurde.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Aufgrund der Größenentwicklung der Containerschiffahrt (Inbetriebnahme von 19.100 TEU-Containerschiffen in 2014, Länge ca. 400 m, Breite ca. 60 m) und der begrenzten Ausbaupkapazität der Seeschiffahrtsstraßen wird zukünftig deren Befahrbarkeitsanalyse für eine optimale Nutzung durch die Schiffahrt eine wachsende Bedeutung hinsichtlich der Schiffsdynamik, aber auch bezüglich der wirtschaftlichen Unterhaltung der Schiffahrtsstraßen (z. B. schiffserzeugte Belastungen der Ufer) bekommen. Eine detaillierte Kenntnis u. a. der Schiffsdynamik (Squat, Trimm, Bank-Effekt und Schiff-Schiff-Interaktion) der zukünftig in den Revieren der WSV verkehrenden großen Fahrzeuge ermöglicht u. a. eine fachlich abgesicherte und für die WSV-Revier validierte Anwendung von z. B. Tidefahrplänen zur Optimierung der Befahrbarkeit der Seeschiffahrtsstraßen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das wesentliche Ziel der Untersuchungen des Teilprojekts *Schiffsdynamik* ist die Bereitstellung von fachlich abgesicherten Daten zur Diagnose und Prognose des Verhaltens großer Seeschiffe (Squat, Trimm und Bank-Effekt) beim Befahren der Flachwasserreviere durch die BAW.

Weiterhin sind die schiffsspezifischen Squat- und Trimmwerte, Querkräfte und Gierrmomente u. a. in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit (Fahrt durch Wasser), des Teilquerschnittsverhältnisses, des Passierabstands vom Ufer und der Neigung der Uferböschung für den wasserstraßenabhängigen maximal zulässigen Tiefgang (Bemessungstiefgang für die Fahrrinne) zu bestimmen.

## 2 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen des Forschungsprojekts Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiffahrtsstraße werden Validierungsdaten für die Weiterentwicklung numerischer Verfahren erfasst, ausgewertet und aufbereitet. Die umfangreichen Untersuchungen im hydraulischen Maßstabsmodell (M 1:40) zur Quantifizierung von Querkräften und Gierrmomenten in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit und Schiffgröße, der Uferneigung, des Passierabstands sowie der Kielfreiheit wurden abgeschlossen. Derzeit werden die Ergebnisse für die Implementierung in die Schiffsführungssimulation vorbereitet (vgl. FuE-Projekt A39550270132).

Die Methodenentwicklung zur Qualitätssicherung von Messungen in der Natur ist ein grundlegender Baustein für eine effiziente und wirtschaftliche Beratung der WSV.

## 3 Ergebnisse

Für die WSV wurde anhand der Fachdiskussion die Erkenntnis abgeleitet, dass eine direkte Berechnung des fahrdynamischen Verhaltens von Schiffen für geometrisch enge Querschnitte wie z. B. dem NOK mit zeitlich aufwändigen, hochauflösenden, reibungsbehafteten validierten RANSE-Modellen für die Tauchung (Squat) und den Trimm vorerst noch auf den Weg zu Stand von Technik und Wissenschaft zu bewerten ist. Die Weiterentwicklung der numerischen Verfahren sowie entsprechende Berechnungen der BAW sind dem FuE-Bericht „Numerische Berechnungen – Schiffshydrodynamik“ (A39550270133) zu entnehmen.

Die BAW berät derzeit das WSA Hamburg zur weiteren Absicherung und Validierung des Tidefahrplans Elbe hinsichtlich der Vergabe, Durchführung und Analyse von Messungen zur Schiffsdynamik großer Containerschiffe bei Revierfahrt. Im Rahmen des FuE-Projekts erfolgte die Methodenentwicklung sowohl zur Erfassung der Validierungsdaten in der Natur als auch zur erforderlichen Qualitätssicherung der Daten Dritter durch die BAW.

Der Schwerpunkt des abgelaufenen Jahres lag in der Qualitätssicherung der durchgeführten Messkampagnen anhand der bisher entwickelten methodischen Ansätze sowie deren Überprüfung und Weiterentwicklung anhand real gemessener Daten.

Dabei wurde u. a. deutlich, dass schon die Ermittlung der verschiedenen Eingangsdaten in die Berechnung des gemessenen Squats in einem Tideästuar (z. B. Methode zur Ermittlung des Tidewasserstands an der aktuellen Schiffposition) zu unterschiedlichen Ergebnissen des tatsächlichen Squats führen kann. Bild 1 zeigt beispielhaft für die Fahrt eines 18.000 TEU Containerschiffs auf der Elbe zwischen dem Hafen Hamburg (ca. Elbe-km 625) bis hinter der Insel Neuwerk (Elbe-km 750) den aus GNSS-Daten berechneten „Tatsächlichen Squat“ des Auftragnehmers (AN, Zeitreihen dunkelgrün / dunkelrot) und die Berechnungen nach den Methoden der BAW (Zeitreihen hellgrün / orange) sowie die entsprechenden Differenzen (unten). Besonders deutlich wird zudem der Einfluss der Verwendung von unterschiedlichen Korrekturdaten für die GNSS-Nachbereitung im Elbe-Abschnitt km 690 bis km 695.

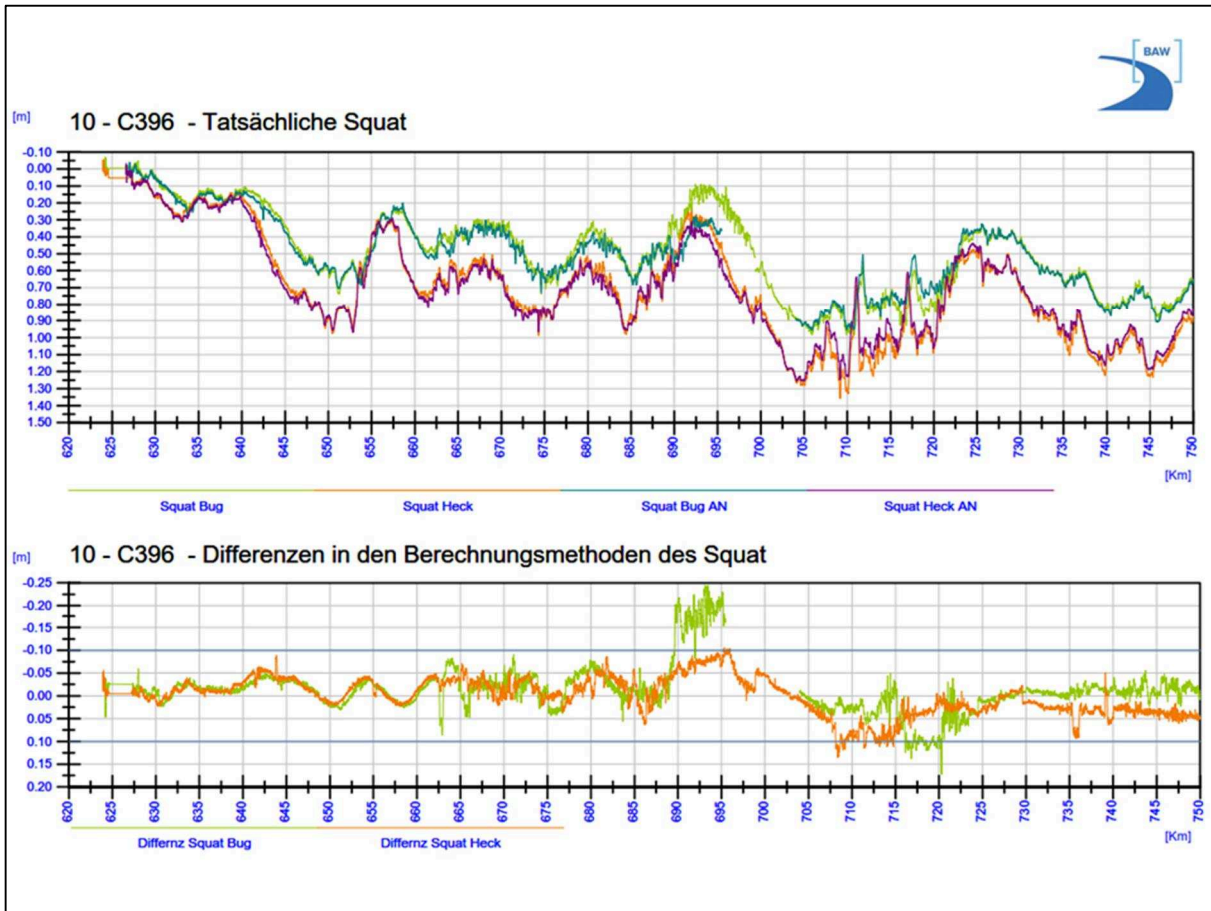


Bild 1: Qualitätssicherung der Berechnungen des „Tatsächlichen Squats“ aus Messungen auf der Seeschiffahrtsstraße Elbe zwischen Hafen Hamburg und See sowie deren Differenzen (Beispiel)

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Mit der Vergabe sowohl des Projektmanagements als auch der Durchführung und Analyse der Messkampagnen sind für die BAW weiterhin umfangreiche Entwicklungsarbeiten zur Qualitätssicherung bezüglich der durch den Auftragnehmer zu erfassenden und zu bearbeitenden Daten angefallen. Die von der BAW zu entwickelnde Methodik zur Qualitätssicherung wird nach den bisherigen Erkenntnissen über die gesamte Zeit der Projektdauer (ca. 20 Messkampagnen) an die Erfahrungen mit dem AN anzupassen sein. Aufgrund der komplexen Messkampagnen erforderte die laufende Qualitätssicherung der bis heute vorgenommenen Messungen in der Natur einen deutlichen Mehraufwand an Prüfverfahren, Beratung und Schulung des Auftragnehmers im Rahmen des FuE-Projekts, so dass eine Projektverlängerung bis Ende 2017 wünschenswert wäre.

Laufzeit des Vorhabens: 2002 bis 2015.

#### 5 Literatur

-/-

#### 6 Veröffentlichungen

-/-



**Schiffsführungssimulation der Revierfahrt (SFS-R)****Netzplan-Nr.:** A39550270132**Projektleiter:** Dr.-Ing. C.-U. Böttner, Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)**E-Mail:** carl-uwe.boettner@baw.de**1 Problemdarstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Schiffsführungssimulatoren werden seit den 60er Jahren erfolgreich in der Aus- und Weiterbildung von nautischem Personal eingesetzt. Da seither die Schiffsgrößen kontinuierlich gesteigert werden, sind auch die Kosten für die Bereitstellung und Unterhaltung der Wasserstraßen überproportional gestiegen. Einsparungen sind nur möglich, indem der Dimensionierung der Seeschiffahrtstraße ein hohes Gewicht eingeräumt wird und diese nur in den Dimensionen bereitgestellt wird, die tatsächlich nötig sind, um die geforderte Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs zu gewährleisten.

Für die Bemessung bedeutet dies, dass ergänzend zu den bewährten Ingenieuransätzen und Richtlinien der tatsächliche Raumbedarf festgestellt werden muss. Hierfür muss zum einem die mathematisch numerische Simulation der Schiffsdynamik und zum anderen die Schiffsführungssimulation eingesetzt werden. Der virtuellen Befahrung kommt eine zentrale Bedeutung zu, wenn die Dimensionen auf das erforderliche Maß begrenzt werden sollen, da sie eine Überprüfung auf nautische Schwachstellen ermöglicht, die sonst möglicherweise erst nach Fertigstellung auffielen und deren Korrektur dann meist sehr kostspielig würde.

Um diese Funktion erfüllen zu können, muss der Schiffsführungssimulator das Verhalten und die Fahrdynamik des Seeschiffs nicht nur physikalisch ähnlich abbilden, wie es für eine Ausbildung gemäß STCW-95 vollkommen ausreichend ist, sondern mit hoher Präzision vorhersagen und berücksichtigen. Für die Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse sind alle Prozesse bei Fahrt im seitlich begrenzten Flachwasser von übergeordneter Bedeutung und somit im Simulator naturähnlich abzubilden, die sonst in der Ausbildung von nautischem Personal an einem Simulator nur als Phänomen spürbar und erfahrbar sein müssen.

Ziel dieses Vorhabens ist es daher, fahrdynamische Modelle bestehender Schiffsführungssimulatoren so zu verfeinern, dass sie für die Simulation der Revierfahrt von Seeschiffen erweitert und ergänzt werden. Dies soll nach Möglichkeit so erfolgen, dass die WSV diese Entwicklungen in einer Simulation zur Bemessung verwenden kann, ohne dafür in der Wahl des Simulators oder Simulatorbetreibers eingeschränkt zu sein.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Eine fachlich abgesicherte Möglichkeit zur verbesserten Ausnutzung der Seeschiffahrtsstraßen bietet ein immenses Einsparpotential bei den Unterhaltungskosten. Dabei muss im Vorfeld der Nachweis der Gewährleistung der Leichtigkeit und Sicherheit des Verkehrs trotz möglichst wirtschaftlicher Bemessung erbracht werden können, um erhöhte Folgekosten für nachträgliche Anpassung der Wasserstraße und Reparaturen durch Unfälle auszuschließen.

**1.3 Untersuchungsziel**

Ermittlung und Festlegung der notwendigen Präzision der fahrdynamischen Modelle in der Schiffsführungssimulation zur Absicherung der Bemessung. Parallel dazu Entwicklung von Modellen und Ansätzen der Fahrdynamik von Seeschiffen bei Flachwasserbedingungen entsprechend den ermittelten Vorgaben und deren Bereitstellung zur Einbindung in Schiffsführungssimulationen zur Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse.

## 2 Untersuchungsmethoden

Es werden verschiedene Methoden verfolgt und eingesetzt. Zunächst wird eine Sensitivitätsstudie zur Bedeutung der unterschiedlichen Anteile der Fahrdynamik für die Bemessung der Wasserstraße durchgeführt. Hier werden die einzelnen fahrdynamischen Größen und Effekte gemeinsam mit der jeweiligen notwendigen Genauigkeit für eine belastbare, wirklichkeitsgetreue Simulation der Revierfahrt ermittelt. Daraus ergeben sich direkt die Aufgaben für die Entwicklung der einzelnen analytischen Ansätze und fahrdynamischen Modelle. Im letzten Schritt werden diese in Form von Modellmodulen zur Verwendung bei Simulationen der Revierfahrt in Schiffsführungssimulatoren aufbereitet und der WSV bereitgestellt. Die Entwicklung der analytischen Ansätze und fahrdynamischen Modelle baut auf den Ergebnissen (in Form von Validierungsdaten und analytisch funktionalen oder tabellarischen Eingabewerten) der beiden anderen Teilprojekte der Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff – Seeschiffahrtstraße auf.

## 3 Ergebnisse

Im Jahr 2014 wurde die erweiterte PlugIn-Schnittstelle von RDE gemeinsam mit der BAW entwickelt und konnte als Prototyp getestet werden. Ab September stand diese dann bereit und wurde bereits an einen Simulatorbetreiber im Rahmen seines Upgrades auf ANS6000 ausgeliefert. Damit sind die Anforderungen der BAW an den Schiffsführungssimulator als adaptierbares Werkzeug für die Belange der WSV erfüllt. Die neue Plug-In-Schnittstelle erforderte umfangreichere Neuentwicklungen und Anpassungen in der Simulatorsoftware. Daher wurde in Anbetracht des Umstandes, dass die meisten Betreiber an der Küste ein Upgrade durchführen oder planen, auf die Erweiterung des alten Standes ANS-5000 verzichtet. In 2015 wird der Simulator der BAW in Hamburg und in Karlsruhe auf den ANS-6000 aufgerüstet.

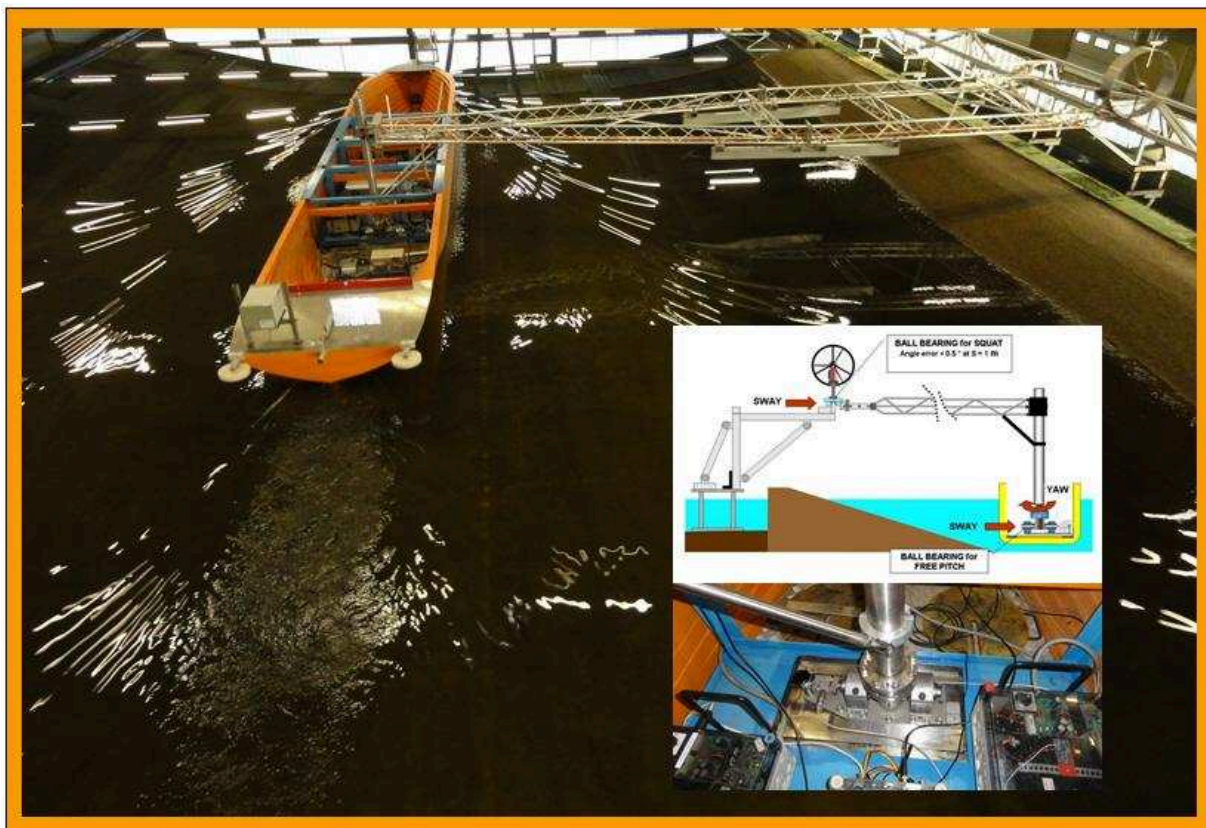
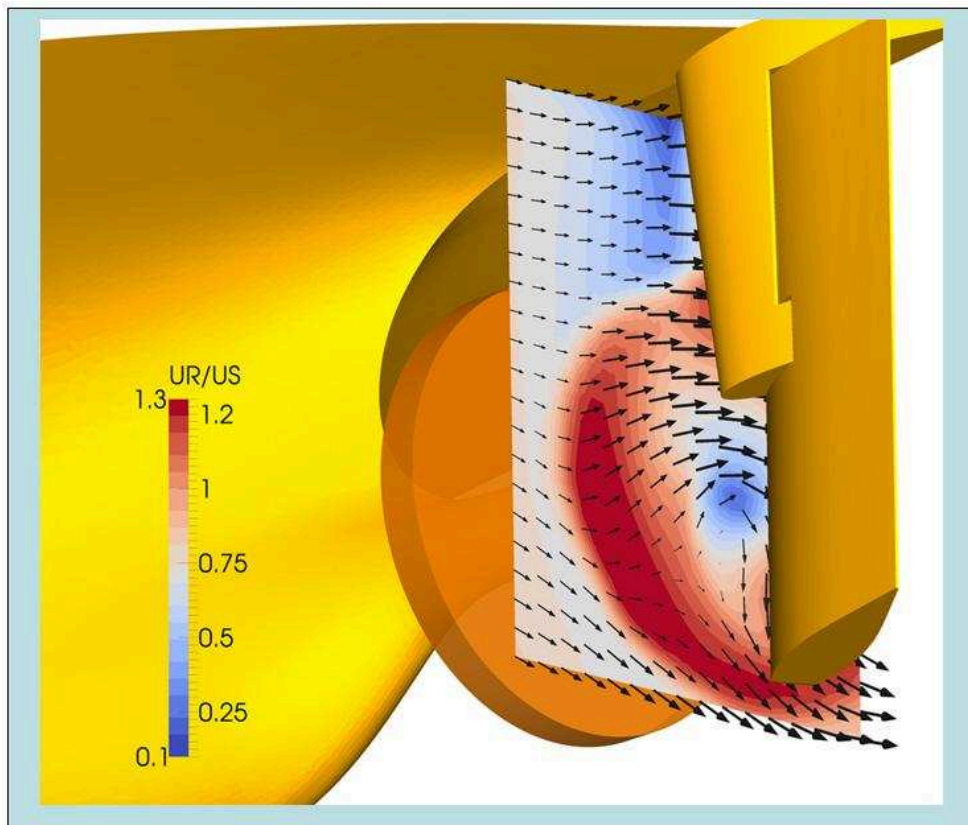


Bild 1: Messungen zu Bank-Kräften in der Halle 1 der BAW in Hamburg

Neben den Tests der Plug-In Funktionen und Funktionalität wurde die systematische Auswertung der Versuchsserie zu Banking-Kräften aus der Halle 1 (siehe Bild 1) begonnen. Da diese Serie mehreren

Variationsparametern unterliegt, neben Wasserstand, Geschwindigkeit und Bankabstand sind dies verschiedene Schiffstypen, Böschungswinkel und eingesetzte Messtechnik, ist eine systematische Auswertung unter mehreren Aspekten möglich und nötig. Hierfür wurde entschieden, sowohl alle Schiffsmodelle als auch die Messfahrten in eine relationale Datenbank aufzunehmen. Damit wird eine gezielte Analyse nach bestimmten Größen ermöglicht. Diese Datenbank wurde im Herbst 2014 geplant und begonnen aufzusetzen, die Auswertung wird in 2015 abgeschlossen.



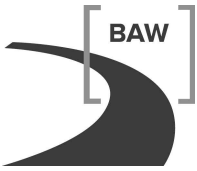
*Bild 2: Analyse der Strömungsbedingungen im Bereich der Anströmung des Ruderblatts mittels numerischer Strömungssimulation durch Lösung der RANS-Gleichungen mit OpenFOAM, Vergabe an die TU-Berlin, Fachgebiet Dynamik Maritimer Systeme.*

Es hat sich gezeigt, dass die Ruderwirksamkeit in der Simulation ein sensibler Faktor ist, der über die Manövrierfähigkeit das Ergebnis einer Befahrbarkeitsanalyse oder Bemessung beeinflusst. Daher wurden numerische Analysen an die TU-Berlin vergeben, in denen die Strömungsbedingungen am Ruder bei Flachwasser und unter Manöverbedingungen untersucht werden.

**4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Mit Verfügbarkeit der erweiterten Plug-In Schnittstelle wird in 2015 die Erstellung von Plugins für die Simulation der Revierfahrt den Schwerpunkt der Arbeiten bilden. Das eine dient der Berechnung des Squat in Abhängigkeit der Verblockung in der Wasserstraße und das andere zur Berechnung der Bank-Kräfte, die auf der Auswertung der Messungen basiert. Hierfür ist ein weiterer Tätigkeitsschwerpunkt die systematische Auswertung der abgeschlossenen Versuchsreihe zu Bank-Kräften in der Halle 1.

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2015, eine Verlängerung bis 2017 ist sinnvoll und beantragt.



## 5 Literatur

-/-

## 6 Veröffentlichungen

Böttner, C.-U. (2014): Wechselwirkung Seeschiff/Seeschiffahrtsstraße – Methoden zur Bearbeitung von Fragestellungen der WSV. Vortrag: 35. Duisburger Kolloquium Schiffstechnik/Meerestechnik der Bundesanstalt für Wasserbau, der Universität Duisburg-Essen und des Entwicklungszentrums für Schiffstechnik und Transportsysteme, Duisburg, 15./16. Mai 2014. Veröffentlichung: Tagungsband

## **Numerische Berechnung der Schiffshydrodynamik und Manövrierfähigkeit im Flachwasser (SHD-F)**

**Netzplan-Nr.:** A39550270133

**Projektleiter:** Dr.-Ing. C.-U. Böttner, Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)

**E-Mail:** carl-uwe.boettner@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Fragestellung besteht aus der Bestimmung der Strömungsverhältnisse und Transportvorgänge in der Umgebung des Schiffs und in der Wasserstraße. Während in den vergangenen Jahrzehnten eine rege Forschungs- und Entwicklungstätigkeit bei der Schiffsumströmung zu verzeichnen ist, wurde der Aspekt des Flachwassereinflusses und der geringen Kieffreiheit bisher wenig beachtet. Das liegt darin begründet, dass dieser Fahrzustand in der Dienstzeit eines Schiffes nur zu einem geringen Teil vorkommt und daher für die Schiffseigner eine untergeordnete Rolle spielt, aber auch darin, dass die mathematisch numerische Modellierung noch erheblich anspruchsvoller ist, wenn Verblockungseffekte und sich vereinigende Grenzschichten zu berücksichtigen sind. Für die WSV ist hingegen die Revierfahrt unter Flachwassereinfluss der einzig relevante Fahrzustand. In der jüngsten Vergangenheit haben Rechnerleistung und Speicherkapazitäten einen Stand erreicht, der es ermöglicht, Kräfte, Momente und die auftretende Fahrdynamik mathematisch numerisch vorherzusagen und zu beschreiben. Damit werden dringend benötigte Daten und Werte für die Bemessung und die wirtschaftliche Ausnutzung der Seeschiffahrtsstraßen erreichbar, die sich experimentell, aus dem physikalischen Modellversuch oder aus Naturmessungen, nur sehr aufwändig oder gar nicht gewinnen lassen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Verfügbarkeit eines Verfahrens zur Vorhersage fahrdynamischer Größen im Flachwasser ist bei vielen Aufgaben der WSV hilfreich. Häufig existieren die Schiffe, zu denen die Fragestellung erarbeitet wird, nicht oder noch nicht, dennoch müssen Aussagen zur Befahrbarkeit gemacht und verbindliche Entscheidungen getroffen werden. Hierfür ist die Verfügbarkeit einer verlässlichen Datenquelle in Form eines mathematisch numerischen Verfahrens ein wichtiges Werkzeug von großer Bedeutung.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Ziel in diesem Teilprojekt der Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff-Seeschiffahrtsstraße ist es, bestehende und verfügbare mathematisch numerische Verfahren zur Berechnung der Schiffshydrodynamik zu validieren, zu erweitern und zu ergänzen um künftig Verfahren bereit zu stellen, die als verlässlich zur Vorhersage von Kennwerten der Schiffsdynamik im Flachwasser anerkannt sind.

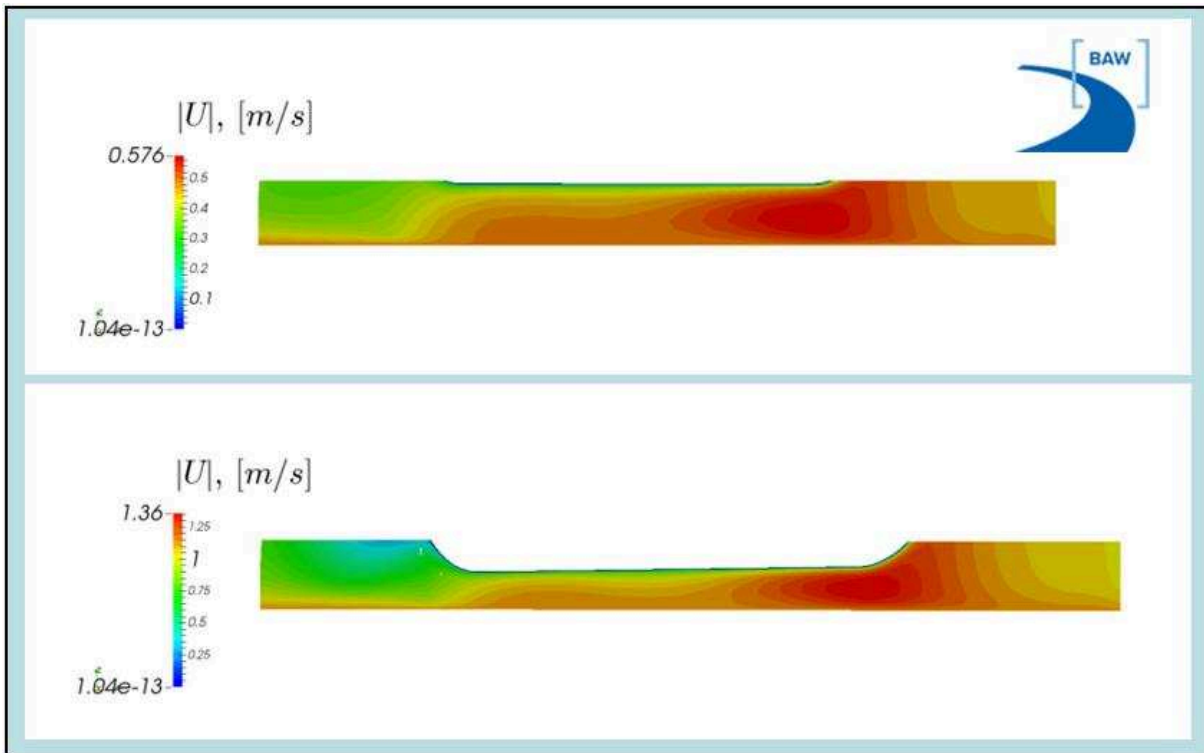
### **2 Untersuchungsmethoden**

Verfügbare bestehende Verfahren werden anhand von experimentellen Werten aus Naturmessungen und dem physikalischen Modellversuch überprüft, validiert und gezielt weiterentwickelt. Die hierfür benötigten experimentellen Daten werden zum Teil im Rahmen des hier beantragten Projekts ermittelt, zum Teil aus parallelen Teilprojekten und aus Kooperationen, sowie aus der Literatur und aus Vergabeleistungen zusammen gestellt. Die Weiterentwicklungen der Verfahren werden von Fremdleistungsnehmern als Vergabeleistung und durch die Projektmitarbeiter im Referat K2 betrieben.

### **3 Ergebnisse**

Im Berichtszeitraum lagen die Schwerpunkte der numerischen Berechnungen bei der Untersuchung der Strömungsverhältnisse zwischen Rumpfboden und Gewässersohle. Angeregt wurde diese Untersuchung durch das aus Messungen im physikalischen Modell und numerischen Strömungssimulationen mit RANSE mehrfach bestätigte Phänomen des ab einem  $h/T$  von etwa 1,3 verstärkt auftretenden Trimmwinkels. An der Universität Rostock (Prof. Kornev) wurde der hybride Löser SHIP-LES als Bestandteil von OpenFOAM entwickelt und eingesetzt. Mit diesem Ansatz soll eine weitergehende

Analyse der Strömungsbedingungen unter dem Rumpf erfolgen, da diese Technik eine feinere Auflösung von Strukturen in einer Strömung ermöglicht als die Lösung der Reynolds' gemittelten Navier-Stokes Gleichungen. Erste Vergleichsrechnungen als Basis für die vergleichende Analyse sind in Bild 1 dargestellt.



**Bild 1:** Stark überhöhte Darstellung des Geschwindigkeitsprofils zwischen Rumpf und Sohle ( $h/T = 1.15$ ,  $V_{Schiff} = 6 \text{ kn}$  (oben) und  $12 \text{ kn}$  (unten)), zu erkennen ist bereits in der RANSE-Lösung, der Kontakt der Grenzschichten.

Es ist gute wissenschaftliche Praxis, solche numerischen Untersuchungen mit Messungen in der Natur oder aus dem physikalischen Modellversuch zu begleiten, ergänzen und abzusichern. In dem Fall der Strömungsstrukturen sind Messungen im Modellversuch wegen des sehr engen Spalts unter dem Rumpf und der resultierenden schlechten Zugänglichkeit besonders anspruchsvoll. Messwerte sind notwendig, um die Strömungsvorgänge in diesem Spalt analysieren und interpretieren zu können. Die Auswertung der numerischen Ergebnisse wird durch Messwerte ebenfalls belastbarer. Es wurden daher ein Versuchsaufbau und eine Versuchsmatrix für optische Strömungsmessungen im physikalischen Modellversuch ausgearbeitet, die in einer schiffbaulichen Schlepprinne durchgeführt werden können. Die Versuche sollen an eine Schiffbauversuchsanstalt vergeben und in 2015 durchgeführt werden.

Ein Ziel des Projektes ist zukünftig ein numerisches Werkzeug zur Verfügung zu haben, das es ermöglicht Kräfte der Interaktion Schiff mit Wasserstraße belastbar abzuschätzen und das Manövrierverhalten eines Schiffs bei Revierfahrt vorherzusagen. Die Vorhersage der Manövriereigenschaften war auch Thema des internationalen Workshops SIMMAN (*Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods*) der 2014 stattfand. Dieses Mal wurden die Manövriereigenschaften im Flachwasser als Testfall neu hinzugenommen, so dass sich eine Teilnahme aus diesem FuE-Projekt heraus anbot, siehe Bild 2.

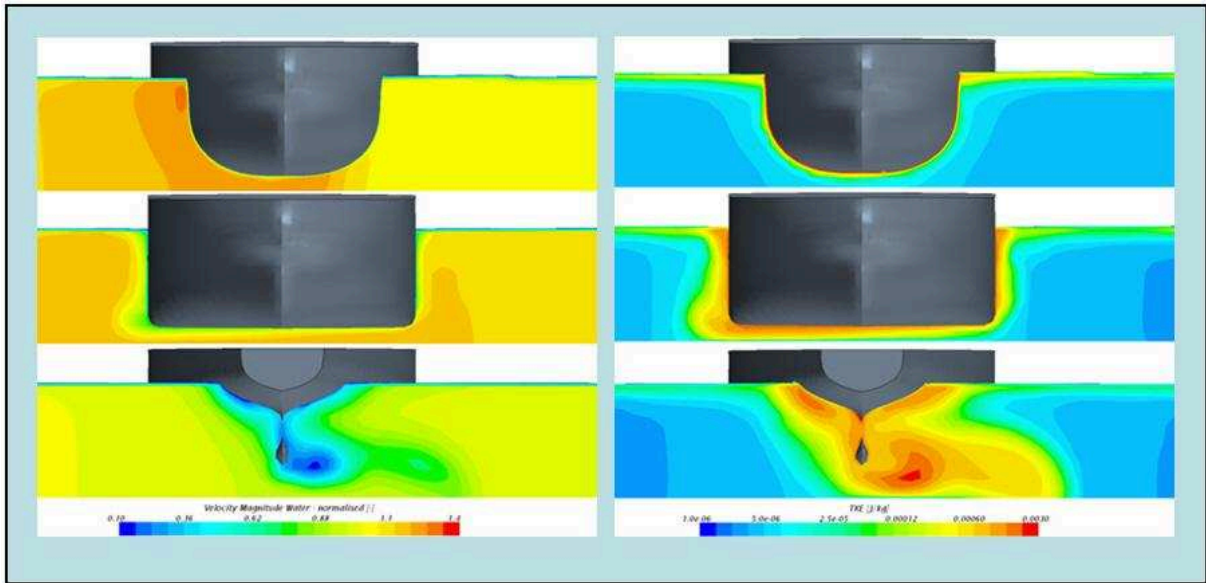


Bild 2: Rechenergebnisse aus der Teilnahme am internationalen Workshop SIMMAN2014, großer Tanker im Flachwasser, links: Strömungsgeschwindigkeiten und rechts: turbulente kinetische Energie in drei Schnittebenen längs des Rumpfs.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Im Bearbeitungsjahr 2015 werden in diesem Projekt die Strömung zwischen Schiffsboden und Gewässersohle sowie weiterhin die Schiff-Schiff-Interaktion im Fokus stehen. Von einer Analyse der Strömung im Spalt zwischen Rumpf und Gewässersohle wird Aufschluss über die Aufwirbelung von Bodensediment und dessen schiffsinduzierten Transport, sowie über Mechanismen des Squatverhaltens bei sehr geringer Kielfreiheit erhofft und erwartet. Das Ziel des Projekts, die numerische Vorhersage von Manövriereigenschaften und die strömungsmechanische Ermittlung von Manövrierkoeffizienten bleibt weiterhin bestehen. Die zur Validierung benötigten Messungen mit freimanövrierenden Modellschiffen mussten verschoben werden und sind nun für Ende 2015 oder 2016 vorgesehen.

Die für das Berichtsjahr geplanten Untersuchungen zu Windabschattungen und Windkräften auf Containerschiffen mussten ebenfalls in das Bearbeitungsjahr 2015 verschoben werden. Diese Ergebnisse werden für Schiffsführungssimulationen bei langsamer Revierfahrt benötigt und sind auch bei der Analyse von Begegnungsmanövern relevant.

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2015, eine Verlängerung bis 2017 ist sinnvoll und vorgesehen.

#### 5 Literatur

-/-

#### 6 Veröffentlichungen

Böttner, C.-U.; Kastens, M. (2014): „Contribution to numerical Test Cases in shallow water conditions“ SIMMAN2014 Workshop, Dezember 2014, Lyngby, Denmark

## **Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen**

**Netzplan-Nr.:** A39550270141

**Projektleiter:** Dr.-Ing. K. Uliczka, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Ästuarsysteme I (K2)

**E-Mail:** klemens.uliczka@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg, berät die für den Bereich der Küstenregionen zuständigen Wasser und Schifffahrtsämter (WSÄ) der Wasser und Schifffahrtsverwaltung (WSV) u. a. hinsichtlich Funktion und Stabilität von Strombauwerken an den Seeschiffahrtsstraßen (SeeSchStr) der Tideästuare, der Ostsee sowie dem Nord-Ostseekanal.

Schadensfälle an Leitwerken und Buhnen sowie Deckwerken an den Seeschiffahrtsstraßen aufgrund schiffserzeugter Belastungen wurden in der letzten Dekade verstärkt in der Außenweser sowie in der Unterelbe festgestellt. Für eine Abschätzung der schiffserzeugten, langperiodischen hydrodynamischen Belastung der Deckschichten als Basis für die Ermittlung der erforderlichen Steingrößen / -gewichte konnten nur vorhandene theoretische, fachlich nicht exakt zutreffende und nur bedingt gültige Ansätze verwendet werden (BAW, 2010). Hoch instationäre und turbulente hydrodynamische - zudem in Tideästuaren wasserstandsabhängige - schiffserzeugte Belastungen führen zu komplexen Untersuchungsaufgaben. Diese zeichnen sich aus durch eine hohe Zahl an zu erfassenden und physikalisch zu beschreibenden hydrodynamischen Parametern, verteilt über verschiedene zu bemessende Abschnitte von Leitdämmen und Buhnen einschließlich deren Anbindung an die Ufersicherungen.

Durch die Kooperation mit universitären Einrichtungen wie dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) der TU Braunschweig sowie dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen werden wichtige Impulse für - über dieses Projekt hinausgehende - weitere Grundlagenforschungen erwartet, so dass dadurch ein zusätzlicher Mehrwert auf diesem WSV-relevanten Forschungsgebiet durch ebendiese Universitätsinstitute geschaffen wird.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Aufgrund der weiterhin zunehmenden Größenentwicklung der Containerschiffahrt mit der Inbetriebnahme von 14.000 TEU-Containerschiffen in 2010 und von 19.100 TEU-Containerschiffen mit Längen von ca. 400 m und Breiten bis ca. 60 m in 2014 erhält die nachhaltige Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken und Ufersicherungen an den Seeschiffahrtsstraßen der Tideästuare bei der Kenntnis der bemessungsrelevanten Parameter der schiffserzeugten Belastungen eine wachsende Bedeutung. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in Form von Bemessungshinweisen für Vorhabensträger der WSV an Seeschiffahrtsstraßen erarbeitet und von der BAW veröffentlicht. Die Dringlichkeit des FuE-Projekts ergibt sich aus der akut erforderlichen, fachgerechten und nachhaltigen Sanierung der Schadensfälle (z. B. Außenweser Langlütjennord und Unterelbe Juelssand).

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Dieses FuE-Projekt hat zum Ziel, fundierte Unterlagen für den Bereich der Seeschiffahrtsstraßen der WSV an Nord- und Ostsee zu erarbeiten, die eine fachlich abgesicherte und nachhaltige Bemessung auf die langperiodischen, schiffserzeugten Lastfälle durch Wellen und Strömung bzw. Überströmen ermöglichen. Dazu sind im Wesentlichen folgende Untersuchungsschwerpunkte zielführend:

- Grundsätzliche Erfassung der kurz- und langperiodischen schiffserzeugten physikalischen Prozesse im Nahbereich von Leitdämmen und Buhnen.
- Ableitung analytischer Ansätze zur nachhaltigen Bemessung von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen mit Bestimmung bemessungsrelevanter Parameter anhand von Messdaten.
- Aufbereitung abgesicherter Validierungsdaten für numerische Verfahren u. a. aus fachübergreifenden Forschungsgebieten der Geotechnik.



- Anwendung / ggf. Entwicklung hydrodynamisch-numerischer Verfahren zu schiffserzeugten Belastungssituationen von Deckschichten an Strombauwerken.
- Vergleichende Bewertung probabilistischer Bemessungsverfahren zum Einsatz in der WSV.

## 2 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen des Projekts mit LWI und IWW sind umfangreiche methodenübergreifende Untersuchungen an Seeschiffahrtsstraßen zur langperiodischen schiffserzeugten Belastungen im Nahbereich von Leitdämmen und Buhnen wie u. a. das Prüfen von vorhandenen empirisch-analytischen Ansätzen, klein- und ggf. großmaßstäbliche 2D und 3D-Untersuchungen, hydrodynamisch-numerische Simulation, Monitoring in der Natur sowie die Erarbeitung von probabilistischen Bemessungsansätzen parallel zur deterministischen Bemessung vorgesehen. Des Weiteren sind hinsichtlich einer ganzheitlichen Betrachtung der Aufgabenstellung enge projektübergreifende Kontakte mit dem FuE-Projekt A39550170270 der BAW aus dem Fachgebiet Geotechnik vorgesehen.

## 3 Ergebnisse

Nach der in 2012 abgeschlossenen Schadensanalyse (Arbeitspaket AP1; BAW, 2012) liegen die Berichte der Prozess- und Wissensstandsanalyse (AP2; IWW, 2012), der Parametrisierung von gemessenen Schiffswellen in Modell und Natur (AP3; LWI, 2012), zu den kleinmaßstäblichen 2D-Untersuchungen zur Erfassung der maßgebenden Prozesse und zur hydraulischen Stabilität (AP4; IWW, 2013) sowie zur Entwicklung eines 3D-CFD/CSD-Modells und numerische Stabilitätsuntersuchungen (AP5; LWI, 2013) vor. Weitergehende Stabilitätsuntersuchungen zum AP4 im Modellmaßstab 1:7,5 hinsichtlich der langperiodischen dynamischen Wellenbelastung wurden beauftragt und sind nach Vorversuchen in 2014 für 2015 am IWW der RWTH Aachen vorgesehen.

Die im AP4b (kleinmaßstäbliche 3D-Untersuchungen zu alternativen Buhnensystemen) im Flachwasserbecken der BAW-DH vorgenommenen dreidimensionalen Modellversuche (Maßstab 1:40) wurden in 2014 abgeschlossen, die Ergebnisse werden derzeit in einem Forschungsbericht zusammengestellt und bewertet.

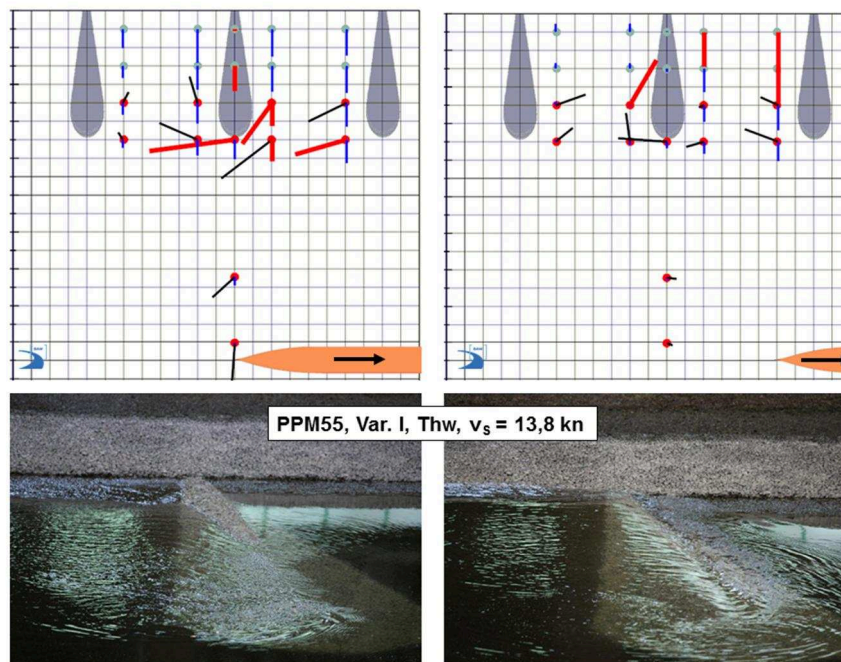


Bild 1: Kritische phasenabhängige langperiodische Strömungs- und Wellenbelastung eines Buhnenbauwerks bei Passage eines 12.000 TEU Containerschiffs (Modellmaßstab 1:40) mit synoptischen Strömungsvektoren und Wasserspiegeländerungen in den Buhnenfeldern (BAW)

Die kritischen Phasen der Bauwerksüberströmung durch die langperiodische dynamische Primärwelle sind in Bild 1 beispielhaft für Tidehochwasser zusammengestellt. Die synoptischen Strömungsvektoren (schwarz, Maxima rot) sowie die zeitgleichen Wasserspiegellagen (blau) sowie die entsprechende Fotodokumentation verdeutlichen die dynamische Belastung des Bühnenbauwerks bei der Passage eines 12.000 TEU Containerschiffs mit einer Schiffsgeschwindigkeit von  $v_S = 13,8$  kn in der Fahrrinne (PPM55, lpp = 352 m, b = 55 m, t = 13,8 m, Variante. I, Thw). Während im linken Bildteil die langperiodische Heckwelle nach der Absunkphase auf das Bauwerk trifft, zeigt der rechte Bildteil die Phase der einsetzenden überfallartigen Überströmung der Bühne mit einem deutlichen Wechselsprung im Lee des Bauwerks. Die annähernd gleichzeitige langperiodische Überfallströmung entlang der Bühnenkro-ne bestätigt die Naturähnlichkeit von Stabilitätsuntersuchungen im zweidimensionalen Ausschnittsmodell.

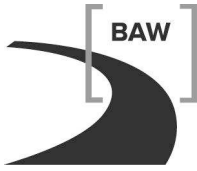
#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Modellphase 3 des AP4 (2D-kleinmaßstäbliche Stabilitätsuntersuchungen - Langperiodische dynamische Belastung) wurde an das Institut IWW für 2015 vergeben. Die Vergabe von Teilaufgaben zum Monitoring von Stabilitätsversuchen in der Natur an die Hochschule HafenCity-Universität Hamburg (HCU) ist erfolgt. Die bisher geplanten, noch abzuarbeitenden Arbeitspakete (u. a. kleinmaßstäbliche und großmaßstäbliche Untersuchungen, Monitoring von Pilotprojekten in der Natur, Bewertung probabilistischer Bemessungsverfahren) werden voraussichtlich einen Bearbeitungszeitraum von rund zwei Jahren in Kooperation mit den WSÄ Hamburg und Bremerhaven, dem IWW sowie der HCU in Anspruch nehmen. Zudem wird erwartet, dass aufgrund der Initiierung des Forschungsprojekts durch die BAW weitergehende Grundlagenforschungen von den beteiligten wissenschaftlichen Institutionen gesehen und in Rahmen einer Verbundforschung aufgegriffen werden.

Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 2016.

#### 5 Literatur

- BAW (2010): Bemessung der Strombauwerke in der Außenweser unter Berücksichtigung von Schiffswellenbelastungen. Gutachten BAW-Nr. A39550210120, Hamburg (*unveröffentlicht*)
- BAW (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen, AP1 – Schadensanalyse. BAW-Nr. A39550270141, Hamburg (*unveröffentlicht*)
- HPA (2011): BAW-FuE-Projekt „Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten an Seeschiffahrtsstraßen“ - Schadensfälle an Hamburger Stacks, Hamburg (*unveröffentlicht*)
- IWW (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen, AP2 – Wissensstandsanalyse der an der Wellen-Strombauwerk-Interaktion beteiligten Belastungsprozesse. RWTH Aachen (*unveröffentlicht*)
- IWW (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen, AP4 – Kleinmaßstäbliche Untersuchungen zur Erfassung der maßgebenden Prozesse und zur hydraulischen Stabilität (Zwischenbericht 2013), RWTH Aachen (*unveröffentlicht*)
- LWI (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen, AP3 – Bestimmung der bemessungsrelevanten Parameter schiffserzeugter Wellen in SeeSchStr (Parametrisierung der Schiffswellen. TU Braunschweig (*unveröffentlicht*))
- IWW (2013): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen, AP4 – Kleinmaßstäbliche Untersuchungen zur Erfassung der maßgebenden Prozesse und zur hydraulischen Stabilität, RWTH Aachen (*unveröffentlicht*)
- LWI (2013): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen, AP5 – Entwicklung eines 3D-CFD/CSD-Modells und numerische Stabilitätsuntersuchungen (Numerische Simulation). TU Braunschweig (*unveröffentlicht*)



## 6 Veröffentlichungen

Uliczka, K. (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen – FuE-Kooperation von LWI (TU BS) / IWW (RWTH) / HPA / BAW. BAW-Kolloquium 21.09.2012, Hamburg

## Schiffserzeugter Sedimenttransport in Seeschiffahrtsstraßen

**Netzplan-Nr.:** A39550270142

**Projektleiter:** Dr.-Ing. K. Uliczka, Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. (FH) B. Kondziella, Referat Ästuarsysteme I (K2)

**E-Mail:** klemens.uliczka@baw.de; bernhard.kondziella@baw.de

### 1 Problemdarstellung und Ziel

#### 1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Im Rahmen der Betrachtung des tidebedingten Sediment- und Schwebstofftransports in den Seeschiffahrtsstraßen und der verstärkten Sedimentation in den anliegenden Hafenanlagen der Ästuar nach den vergangenen Ausbaumaßnahmen der Fahrrinnen stellte sich vermehrt in den letzten 10 Jahren die Frage nach dem Anteil von Schiffspassagen der immer größer werdenden Fahrzeuge am residuellen Sedimenttransport.

Nach einer ersten Schrifttumsrecherche ist festzustellen, dass der schiffserzeugte Sedimenttransport zum einen hinsichtlich der Resuspension oder Erosion von Uferzonen in Binnengewässern oder an Küstenstreifen durch schiffserzeugte Wellensysteme untersucht wurde. Des Weiteren wurden die schiffserzeugte Suspensionserhöhung integral im Gewässerquerschnitt im Vergleich zu natürlich induzierten Werten abgeschätzt, hauptsächlich aber Binnengewässer und Flüsse bei Passagen von Schubschiffen, Küstenmotorschiffen oder kleineren Schiffseinheiten wie auch Sportbooten untersucht. Darüber hinaus wurden einfache analytische Ansätze entwickelt, mathematische Modellierungen eingesetzt und verglichen sowie z. B. hinsichtlich der Auswirkungen des Propellerstrahls vorhandene Ansätze auf der Basis neuer numerischer Modelle und Messungen in der Natur überprüft.

#### 1.2 Bedeutung für die WSV

Aufgrund der weiterhin zunehmenden Größenentwicklung der Containerschiffahrt (Inbetriebnahme von 19.100 TEU-Containerschiffen in 2014) und der erneut geplanten Anpassung der Fahrrinnen der Seeschiffahrtsstraßen an die Containerschiffahrt erhält die Kenntnis des schiffserzeugten Sedimenttransports als Teil des Sedimentregimes der Tideästuare eine wachsende Bedeutung. Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen im Rahmen von Strombau- und Sedimentmanagementkonzepten der Wasser- und Schiffahrtsverwaltung (WSV) für die Seeschiffahrtsstraßen berücksichtigt werden. Grundsätzlich werden mit entsprechendem Vorlauf die betroffenen Ämter der WSV sowie die zuständigen Lotsenbrüderschaften in das Vorhaben eingebunden.

#### 1.3 Untersuchungsziel

Die wesentlichen, abschnittsunabhängigen Ziele der Untersuchungen für die Seeschiffahrtsstraßen sind:

- Grundsätzliche Erfassung des schiffserzeugten Sedimenttransports (SeST) mit u. a. instationärer schiffserzeugter Wasserspiegeländerung, instationärer schiffserzeugter Strömung in Betrag, Richtung und Verteilung, Turbulenzmaß und -ausbreitung, Suspensionskonzentration und deren vertikale/horizontale Verteilung, Sedimentologie des Gewässerbetts, lokale Sohl- und Böschungsänderungen sowie relevante Daten der Schiffe und deren Passagen.
- Differenzierung des SeST, räumlich und prozessorientiert: Im Nahfeld des Schiffs mit dessen Anteilen, bewirkt durch die Verdrängungsströmung, durch strömungsinduzierte Druckänderung, durch den Propellerstrahl und/oder Nachstrom. Im Fernfeld mit den Anteilen aus Verdrängungsströmung, welleninduzierter Orbitalströmung. Im ufernahen Bereich mit Anteilen aus Verdrängungsströmung, welleninduzierter Orbitalströmung, welleninduzierter Druckänderung/Turbulenz und Wellenumformungsprozessen.
- Entwicklung empirisch-analytischer Ansätze zur Abschätzung des SeST in Seeschiffahrtsstraßen für das Nahfeld, das Fernfeld sowie die Uferzone sowie
- Ermittlung des Anteils des SeST am Gesamttransport in einem Tideästuar.

## 2 Untersuchungsmethoden

Aufgrund der Abhängigkeit der tidebedingten und schiffserzeugten physikalischen Prozesse, die den SeST in einer Seeschiffahrtsstraße beeinflussen, können nur Messungen in der Natur über die Wirkzusammenhänge Aufschluss geben. Zur ganzheitlichen Betrachtung sind SeST-Messungen im Nah- und Fernfeld sowie in der Uferzone vorgesehen. Dazu sind neben einer vertieften Prozess- und Wissensstandsanalyse (AP1) verschiedenste Arbeitspakete erforderlich, die u. a. unter den folgenden Aspekten abgearbeitet werden. Im AP2 der BAW wurden in 2012 Messungen, u. a. als Erprobung von Verfahren, unter kontrollierten Bedingungen bei geringem „Grundrauschen“ in der Seeschiffahrtsstraße Nordostsee-Kanal (NOK) vorgenommen, um dann mit den geprüften Messverfahren in einem weiteren Schritt weitere Messkampagnen unter Tidebedingungen fortzuführen. Verschiedene Messverfahren wie u. a. stationäre ADCP-Messungen, instationäre ADCP- und SES-Messungen mit begleitender Probenentnahme und weitere Systeme wie z. B. Fächersonarsysteme waren bei der Messkampagne am NOK in 2012 zu erproben und auf ihre Einsatztauglichkeit für die Messaufgabe zu überprüfen. Die Messergebnisse der Hydrodynamik sowie des bereichsweisen schiffserzeugten Sedimenttransports sind prozessorientiert zu analysieren, als empirisch/analytische Ansätze zu formulieren und hinsichtlich des Genauigkeitsmaßes sowie der Gültigkeitsgrenzen zu betrachten.

Die in der Natur erfassten hydrodynamischen Prozesse bei der Umströmung eines Schiffs bei Revierfahrt werden zudem als weitere Validierungsdaten in dem laufenden FuE-Projekt Schiffshydrodynamik in Flachwasser SHD-F (BAW-Nr. A39550270133) verwendet.

## 3 Ergebnisse

Um einen Einblick in die Vielfalt der Verhältnisse in der Wassersäule nach der Passage eines Schiffs zu erhalten, waren im AP2 stichprobenartig über einen längeren Zeitraum zeitlich und räumlich hochauflösende (Sonar-) Profilmessungen zur Erfassung der akustischen Signatur des Nachstroms im Nahfeld eines passierenden Seeschiffs sowohl in der Tideelbe bei Wedel als auch im Nordostsee-Kanal vorgenommen worden (HCU, 2011; HCU, 2012).

An der im Rahmen des AP2 vorgenommene Messkampagne am NOK im September 2012 waren neben der BAW der Partner AquaVision, Utrecht, NL sowie der ABz. Hochdonn des WSA Brunsbüttel beteiligt. Die umfangreichen Ergebnisse wurden nach fachlich relevanten Kriterien dokumentiert und an sohnahen Einzelpositionen, im Vertikalprofil sowie im Gewässerquerschnitt ausgewertet und untereinander abgeglichen. Zur Verdeutlichung der Schwierigkeiten bei der Zuordnung der Rückstreuungssignale (Sediment oder akustische Störung?) bei der Analyse der ADCP-Querprofilfahrten unmittelbar im Nachstrom eines Fahrzeugs wurde beispielhaft eine der Ergebnisdarstellungen aufbereitet und bewertet. Erste Analysen der BAW wurden 2013 vorgestellt (Uliczka und Kondziella, 2013) und erste Zusammenhänge aufgezeigt.

Beispielhaft wurden in Bild 1 die Zeitreihen der sohnahen schiffserzeugten Trübung des Fahrwassers im NOK als Gesamtzahl aller gemessenen Zeitreihen sowie als Median aller Schiffspassagen (Bild 1, oben) sowie zudem für die Schiffstiefgänge von  $t < 6,1$  m und  $t > 6,1$  m aufgetragen (Bild 1, unten). Die Tiefgangsschwelle von  $t = 6,1$  m beschreibt Passagen der NOK-Verkehrsgruppen VG3 und kleiner sowie Passagen von VG4 und größer.

Für weitergehende Analysen der aufbereiteten Messdaten aus dem NOK wurde mit der Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Wasserbau & Hydromechanik, ein Kooperationsrahmenvertrag über die wissenschaftliche Zusammenarbeit auf dem Fachgebiet SeST an SeeSchStr vereinbart. Der abgestimmte Forschungsumfang für 2014 beinhaltete u. a. weitergehende statistische Analysen von Messdaten sowie die Prüfung vorhandener Ansätze zum SeST auf deren Erweiterungsmöglichkeiten. Die bisherigen Ergebnisse anhand der Daten aus dem NOK wurden in einem Zwischenbericht zusammengestellt (UNI Siegen, fwu, 2014).

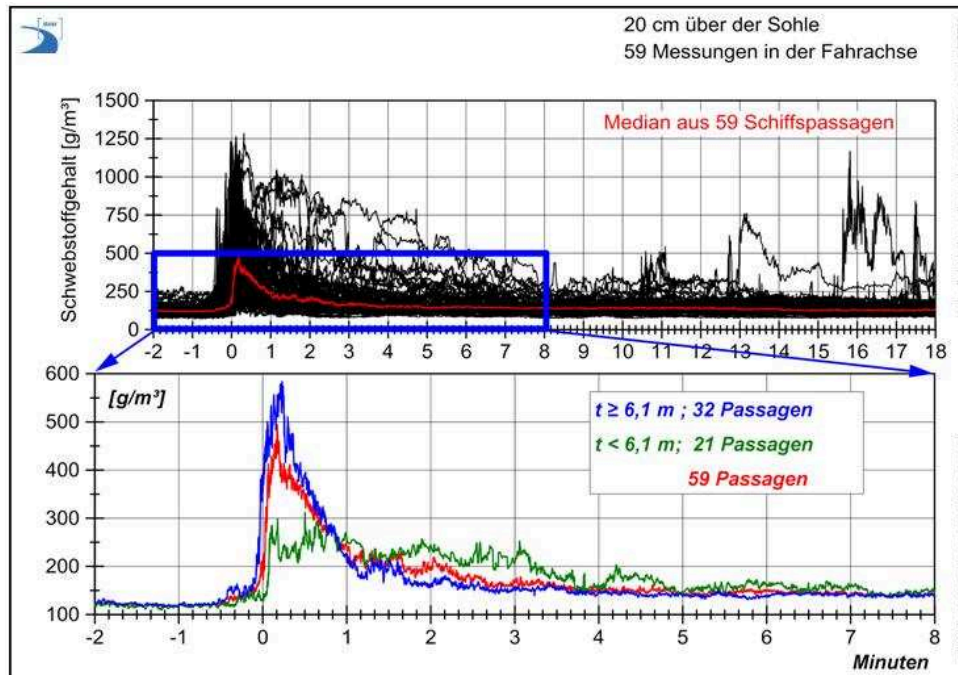


Bild 1: Klassifizierung der Zeitreihen der lokalen schiffserzeugten sohnahen Trübung im NOK durch Berechnung des Median in Abhängigkeit der Tiefgangsschwelle  $t = 6,1 \text{ m}$

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die umfangreichen Messdaten der BAW und des Partners AquaVision am NOK vom September 2012 werden weitergehend analysiert sowie hinsichtlich möglicher Rückschlüsse auf die vorgesehenen Messkampagnen in der Tideelbe bewertet. Im Rahmen des Kooperationsrahmenvertrags mit dem fwu der Universität Siegen werden darüber hinaus der weitere Forschungsumfang des FuE-Projekts fortgeschrieben und gemeinsam bearbeitet.

Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 2016.

#### 5 Literatur

AquaVision (2012): Suspended sediment measurements in the Nord-Ostsee-Kanal. AquaVision BV, Utrecht, The Netherlands (in Englisch; *unveröffentlicht*)

HCU (2012): Erfassung des Gewässerbetts und von Sedimenten im Nordostseekanal (NOK) mit hydroakustischen Methoden. Northern Institute of Advanced Hydrographics / HafenCity Universität Hamburg (*unveröffentlicht*)

Universität Siegen, fwu (2014): Schiffserzeugter Sedimenttransport an Seeschiffahrtsstraßen – Zwischenbericht 11/14 zum Forschungsumfang 2014, Siegen (*unveröffentlicht*)

#### 6 Veröffentlichungen

Kondziella, B., Böder, V., Prokoph, A., Sauer, A. (2013): Forschung und Entwicklung zum schiffserzeugten Sedimenttransport (SeST) im NOK und in der Elbe. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Tagungsband BfG-Kolloquium 11/29012: Neue Entwicklungen in der Gewässervermessung, Koblenz 5/2013 - ISSN 1866 – 220X, [http://doi.bafg.de/BfG/2013/Veranst5\\_2013.pdf](http://doi.bafg.de/BfG/2013/Veranst5_2013.pdf)

Uliczka, K., Kondziella, B. (2013): Auswirkungen der Schiffgrößenentwicklung auf Seeschiffahrtsstraßen. Vortrag und Kurzfassung, BAW-Kolloquium 19.09.2013: Projekte und Entwicklungen für aktuelle Fragestellungen im Küstenwasserbau, Hamburg

**Berücksichtigung von beweglichen oder fixen Strukturen (Schiffe) an der freien Wasseroberfläche im hydrodynamisch numerischen Modell UnTRIM****Netzplan-Nr.:** A39550270149**Projektleiter:** M. Kastens, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)**E-Mail:** marko.kastens@baw.de**1 Problemdarstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

In dem Forschungsprojekt der BAW soll geklärt werden, welchen Einfluss Schiffe auf die Hydrodynamik und damit schließlich auch auf den Sedimenttransport z. B. eines Tideästuars haben. Da sich die komplexen natürlichen Prozesse im Ästuar mit denen der Wechselwirkung eines Seeschiffs mit seiner Seeschiffahrtsstraße überlagern, liegt die Anwendung eines mathematischen Simulationsmodells nahe, um die Anteile der Veränderung der Hydrodynamik durch ein oder mehrere Schiffe zu quantifizieren.

Das mathematische Verfahren UnTRIM ermöglicht die numerische Simulation vieler für das Tidegebiet bedeutsamer physikalischer Prozesse. Hierzu zählen u. a. die Ausbreitung der Tidewelle, der Wechsel von Ebbe- und Flutstrom, der Transport von Salz, Wärme und Schwebstoffen im Wasserkörper. Die derzeit aktuellste Version von UnTRIM (UnTRIM<sup>2</sup>, siehe FuE-Projekt UnTRIM-Subgrid Topographie, A39550370150) kann zusätzlich höhere als durch das Berechnungsnetz aufgelöste Informationen der Bathymetrie an der Gewässersohle verarbeiten (SubGrid-Technologie).

Noch nicht möglich ist zurzeit eine Be-/Einschränkung der freien Wasseroberfläche durch feste und/oder bewegliche Strukturen, wie beispielsweise Schiffe oder von z. B. oben eintauchende Sperrwerkstore - im Folgenden allgemein Verblockung der Wasseroberfläche genannt.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Die gutachterliche Beratung der WSV ist die zentrale Kernaufgabe der BAW. Zur Unterstützung der gutachterlichen Aussagen kommen sehr häufig hydrodynamische numerische Modelle zum Einsatz. In der BAW in Hamburg ist das mathematische HN-Verfahren UnTRIM das meistgenutzte Werkzeug.

Mit zunehmender Häufigkeit wird von den Ämtern der WSV der Einfluss von Schiffen auf die Hydrodynamik und den Sedimenttransport nachgefragt (siehe dazu auch das FuE-Projekt Schiffserzeugter Sedimenttransport in Seeschiffahrtsstraßen, A39550270142). Die Berücksichtigung der oben beschriebenen Verblockungen der freien Wasseroberfläche in dem HN-Verfahren UnTRIM eröffnet die Möglichkeit, den Einfluss von Schiffen auf die Hydrodynamik in einer ersten Näherung zu ermitteln.

**1.3 Untersuchungsziel**

Das Untersuchungsziel ist die Berechnung der veränderten Hydrodynamik aufgrund der Querschnittsverblockung an der freien Wasseroberfläche durch ein Schiff.

Dazu soll im HN-Modell UnTRIM die SubGrid-Technologie auf die freie Wasseroberfläche übertragen werden, so dass eine dynamische Verblockung der Wasseroberfläche im Modell als eine weitere Randbedingung mit berücksichtigt werden kann.

**2 Untersuchungsmethoden**

Erweiterung des HN-Modells UnTRIM (Programmierung) und numerische Modellierung mit dem HN-Modell UnTRIM.

### 3 Ergebnisse

Durch die zusätzliche Randbedingung einer verblockten oder gespannten Oberfläche, wurde es nötig einen Lösungsalgorithmus zu entwickeln, der der zusätzlichen Randbedingung Rechnung trägt und trotzdem Lösungen findet, die robust sind. Casulli & Zanolli (2012) haben einen solchen Algorithmus aufgestellt und dokumentiert.

Dieser Algorithmus wurde ebenfalls von V. Casulli an der Universität Trient in den Programmcode UnTRIM<sup>2</sup> implementiert und getestet. UnTRIM<sup>2</sup> beinhaltet bereits die SubGrid-Technologie (Casulli, 2011), mit der auch Topographiedetails, die kleiner sind als die Diskretisierung des Berechnungsgitters berücksichtigt werden können.

Ferner wurde ein Rahmenmodul in Fortran 95 entworfen, programmiert und getestet, das als Benutzer-Schnittstelle für die Berücksichtigung von oben eingetauchten Hindernissen (Schiffen) im Modell UnTRIM<sup>2</sup> dient. Dieses Modul bedient den UnTRIM<sup>2</sup>-Kern mit dem Setzen der Randbedingung für die gespannte Oberfläche. Es wurde in seiner jetzigen Funktionalität erfolgreich getestet, muss zukünftig jedoch noch weiter entwickelt werden.

Nach dem erfolgreichen Abschluss erster Plausibilitätstests wurden im weiteren Projektverlauf unphysikalische Phänomene in Form von starken Wellenartefakten entdeckt (s. Bild 1). Vor der weiteren Entwicklung mussten die Gründe und Abhängigkeiten, die zu diesen Artefakten führen untersucht werden.

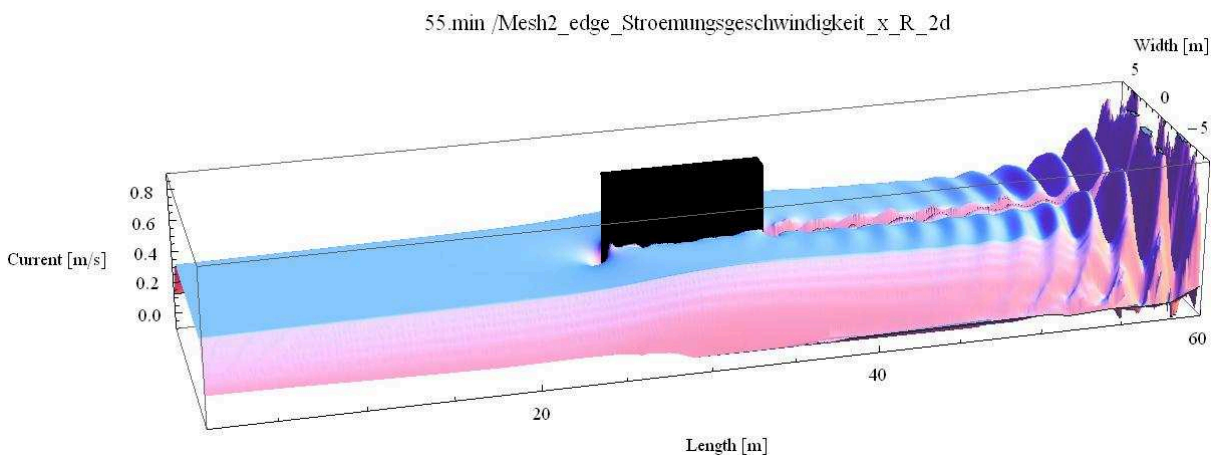


Bild 1: Auftreten von Wellen hinter dem eingetauchten Körper

Umfangreiche Systemstudien und Sensitivitätstests wurden durchgeführt, um das Problem zu lokalisieren. Folgende Parameter und ihr Einfluss auf das Ergebnis wurden untersucht.

- Anströmgeschwindigkeiten von 0.6 - 1.5 m/s
- diverse Gitternetze mit einer horizontalen Diskretisierung von 0.1 - 0.5 m (Subgrid: 0.05 - 0.1m)
- Zeitschrittweiten von 0.05 - 5 s
- Simulationsdauern von 15 min - 6 h
- Crank-Nicholson-Faktoren zwischen 0.6 - 1.0
- hydrostatische und hydrodynamische Varianten
- der Einfluss der turbulente horizontalen und vertikalen Viskosität
- der Einfluss von Reibung und Wandreibung
- das Kriterium des maximalen Abbruchfehlers

Letztendlich konnten Wertebereiche dieser Parameter ermittelt werden, bei deren Verwendung es nicht zu Wellen hinter dem eingetauchten Körper kommt.



#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Nach der Implementierung des neuen UnTRIM-Kerns in die BAW-Umgebung folgten Funktions-, Plausibilitätstests und Parameterstudien der Schnittstelle und des neuen Kerns. Im nächsten Schritt soll die detaillierte Schiffshülle via Schnittstelle in den Modellcode importiert werden. Es folgen weitere Funktions- und Plausibilitätstests (Arbeitspaket 3). Die Bewegung (Arbeitspaket 2) entlang einer Bahnlinie erfolgt erst nach zufriedenstellenden Ergebnissen der oben genannten Schritte.

##### **Arbeitspaket 1:** Softwareentwicklung, Implementierung und Plausibilitätstests des HN-Modells UnTRIM

Die Entwicklung soll folgende Bedingungen/Annahmen erfüllen:

- Die Hülle des Schiffes soll grob wiedergegeben werden (z. B. der Bugwulst muss nicht mit abgebildet werden) - die Auflösung des Schiffes hat dieselbe Subgrid-Auflösung wie die Bathymetrie unter dem Schiff (gleiche Struktur und Größe)
- Um die Berechnungsgeschwindigkeiten praktikabel beizubehalten wird Hydrostatik vorausgesetzt
- Der Fokus liegt auf langen Wellen. Kurzperiodische Wellen werden nicht betrachtet
- Die Kräfte auf das Schiff und die daraus resultierende Lageveränderung des Schiffes werden nicht berechnet (Squat und Trimm)
- In einer ersten Version wird der Schiffskörper statisch an einer Position im Modellgebiet positioniert
- Plausibilitätstests

##### **Arbeitspaket 2:** Softwareentwicklung, Implementierung und Plausibilitätstests des HN-Modells UnTRIM

Die Entwicklung soll folgende Bedingungen/Annahmen erfüllen:

- Der Schiffskörper wird über eine durch externe Daten beschriebene Bahn durch das Wasser geführt
- Diese externen Daten beschreiben die Position, den Tiefgang, den Kurs und die Geschwindigkeit über Grund
- Plausibilitätstests

##### **Arbeitspaket 3:** Schnittstellen, Analysen, Visualisierungen und Validierung

- Literaturrecherche
- Entwicklung von eigenen Datenformaten oder Bereitstellung von Schnittstellen schon verfügbarer Datenformate
  - der Schiffshülle für die Simulation
  - der Schiffsposition, Kurs sowie der Geschwindigkeit
- Schnittstellen zur Datenausgabe von UnTRIM (Schnittprofile und Nahfeldergebnisse)
- Visualisierung und Darstellung (von z. B. Schiffspassagen)
- Parameteranalyse (Wasserstand, Strömung, ...)
- Plausibilitätstests
- Validierungen
- Benchmarks
- Dokumentation
- Anforderungsanalyse zur Erweiterung der vorhandenen Post-Prozessoren Software (Tidekennwertanalyse, Darstellungssoftware, ...)

##### **Arbeitspaket 4:** Validierung der Methode mit Naturmessdaten aus dem FuE-Projekt Schiffserzeugter Sedimenttransport in Seeschiffahrtsstraßen

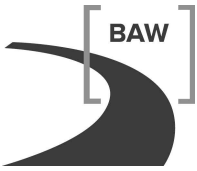
##### **Zeitplan:**

2015: Arbeitspaket 4

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2015.

#### 5 Literatur

Casulli, V. & Stelling, Guus S. (2011): Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Volume 67, Issue 4, Pages 441-449, 10.1002/fld.2361



Casulli, V. & Zanolli, P. (2012): Iterative solutions of mildly nonlinear systems, Journal of Computational and Applied Mathematics, Volume 236, Issue 16, Pages 3937-3947, 10.1016/j.cam.2012.02.042.

## **6 Veröffentlichungen**

Kastens, M. (2013): First application of the new ceiling boundary condition and further outlook; Vortrag auf dem Untrim Users Meeting 2013, Prof. Casulli, Universität Trient, Italien, 27.-29.5.2013

Kastens, M. (2013): Einsatz numerischer Methoden für die Fachaufgabe Schiff – Wasserstraße; Vortrag im Rahmen des BAW-Kolloquiums, Hamburg, 19.9.2013

**Feststofftransport in Ästuaren****Netzplan-Nr.:** A39550270150**Projektleiter:** Dipl. Ing. (FH) Christian Maushake, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)**Bearbeiter:** Dr. rer. nat. Steffen Grünler, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)**E-Mail:** christian.maushake@baw.de, steffen.gruenler@baw.de**1 Problemdarstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Das Verständnis der räumlichen und zeitlichen Veränderung der Hydrodynamik, des Sedimenttransports und der Morphodynamik ist von zentraler Bedeutung für die Unterhaltung von Gewässern als auch für Prognosen der physikalischen Gewässereigenschaften in der Zukunft. Um die in der BAW eingesetzten numerischen Modell- und Berechnungsverfahren kalibrieren und validieren zu können, spielen die Messungen von geophysikalischen Gewässerparametern eine wichtige Rolle. Daraus lassen sich folgende Verwendungszwecke ableiten:

Erfassung von geophysikalischen Gewässergrößen und ästuarspezifischen Eigenschaften für die Validierung von numerischen Modellen bezüglich:

- Tidedynamik
    - max. Strömungsgeschwindigkeiten
    - Durchflussmengen
    - Strömungsverteilung
  - Residuelle Transporte
    - Schwebstoffgehalte
    - Durchfluss
  - Lage und Dynamik der Trübungszone
  - Schichtenaufbau in der Bodengrenzschicht
  - Großräumige Morphologie (Bodenformen)
- Entwicklung einer geeigneten Datenschnittstelle, um Naturmessdaten in einem einheitlichen (quasi-) standardisierten Format für Zwecke der Modellvalidierung und des Datenaustausches zur Verfügung stellen zu können
    - Aufbau eines reproduzierbaren Workflows von der Datenaufnahme, Prozessierung bis zur einheitlichen Datenablage
    - Definition und Aufbau einer international anerkannten Datenschnittstelle für komplexe Naturmessdaten, einschließlich Metadaten
  - Analyse hydrologischer und sedimentologischer Teilprozesse in den Tideästuaren und Küstengewässern:
    - Turbulenz, insbesondere in der bodennahen Schicht
    - Sinkgeschwindigkeiten der Feststoffe in der Wassersäule in charakteristischen Tidephasen
    - Flüssigschlickdynamik, insbesondere Dynamik der Lutokline
    - Zusammenhang zwischen Fluid-Dichten (bulk density) und Feststoffkonzentrationen
    - Bodenformen und sohnaher Sedimenttransport
    - Schwebstoffdynamik und Flokkulationsprozesse in der Wassersäule

Die BAW verfügt über eine ganze Reihe an geeigneten Datensätzen aus Naturmessungen der drei deutschen Hauptästuare (Elbe, Weser, Ems), die hinsichtlich der oben genannten Verwendungszwecke weitergehend zu analysieren sind. Die Validierung der numerischen Modellsysteme ist unabdingbar für das Verständnis der Ästuardynamik und für die Prognosen möglicher naturräumlicher und anthropogener Veränderungen. Die verfügbaren Datensätze aus den Naturuntersuchungen müssen für die Validierung vertieft wissenschaftlich evaluiert werden. Nur so lassen sich aus den Naturmessungen geophysikalische Prozesse studieren, die später zur Weiterentwicklung und Qualitätssicherung der numerischen Modellsimulationen genutzt werden können. Ferner sollen durch wissenschaft-

liche Analysen der vorhandenen Datensätze fachlich gesicherte Vorgehensweisen erarbeitet werden. Da für einige Teilprozesse wie „Sinkgeschwindigkeiten“ und „Flüssigschlickdynamik“ bisher nur eine unzureichende Datengrundlage besteht, sollen aus den Analysen geeigneten Messverfahren abgeleitet und entwickelt werden.

## 1.2 Bedeutung für die WSV

Neben dem weiteren Verständnis der Ästuardynamik stellen die aus den Analysen gewonnenen Erkenntnisse einen elementaren Bestandteil für die Validierung und Weiterentwicklung der numerischen Modellsysteme dar. Die Expertise der Modellierung der langfristigen Feststofftransporte ist im Hinblick für die geplanten Ausbauprojekte der Seeschiffahrtsstraßen (zurzeit: Elbe, Weser, Ems) von großer Bedeutung. Die Prognose der Feststofftransporte z. B. für Fragen des Sedimentmanagements stellt eine zentrale Aufgabe im Rahmen der gutachterlichen Tätigkeit der BAW gegenüber der WSV dar. Die Validierung und Qualitätssicherung der Berechnungsergebnisse ist ohne robuste in-situ-Daten aus Naturuntersuchungen in planrechtlichen Verfahren nicht mehr darstellbar. Damit sind die im Abschnitt 1.1 genannten Mess- und Analyseverfahren von unverzichtbarer Bedeutung für die fachlich gesicherte Aufgabenerfüllung der BAW und für die WSV.

## 1.3 Untersuchungsziel

Ziel des Forschungsprojektes ist die Validierung und Weiterentwicklung der bei der BAW eingesetzten in-situ Methoden zur Untersuchung der Feststoffdynamik und der Austauschprozesse in der Bodengrenzschicht in den Hauptästuaren der Deutschen Bucht (Elbe, Weser, Ems) mit folgenden Teilaufgaben:

- Generierung von Validierungsdaten für die numerische Modellierung
  - Konvertierung akustischer Rückstreuintensitäten in Schwebstoffkonzentrationen aus ADCP-Messungen
  - Analyse der einzusetzenden akustischen Frequenzen (z. B. 300, 600 kHz)
  - Vergleich und Bewertung der Ergebnisse aus akustischen (ADCP, ADV) und optischen Messungen (OBS, LISST)
  - Korrelationsbetrachtungen der gefundenen Schwebstoffbilanzen mit Korngrößenanalysen und Dichteprofilen, sowie der hydrologischen Randbedingungen
  - Ästuarübergreifender Vergleich der Ergebnisse
- Definition und Aufbau einer geeigneten Datenschnittstelle, die den international üblichen Standards zum Austausch komplexer (Naturmess) -Daten entspricht, einschließlich Metadaten.
- Entwicklung und Test von Beobachtungskonzepten, um vorhandene Lücken bei der Beschreibung physikalischer Teilprozesse zu schließen:
  - Fließgeschwindigkeiten in hochkonzentrierten Suspensionen
  - Untersuchungen zur Beschreibung der Lutokline (dynamisch)
  - In-situ Erfassung von Sinkgeschwindigkeiten
  - Weitere Entwicklung bzw. Erprobung von Methoden zur Beobachtung der Charakteristik von Schwebstoffen und der Flockendynamik

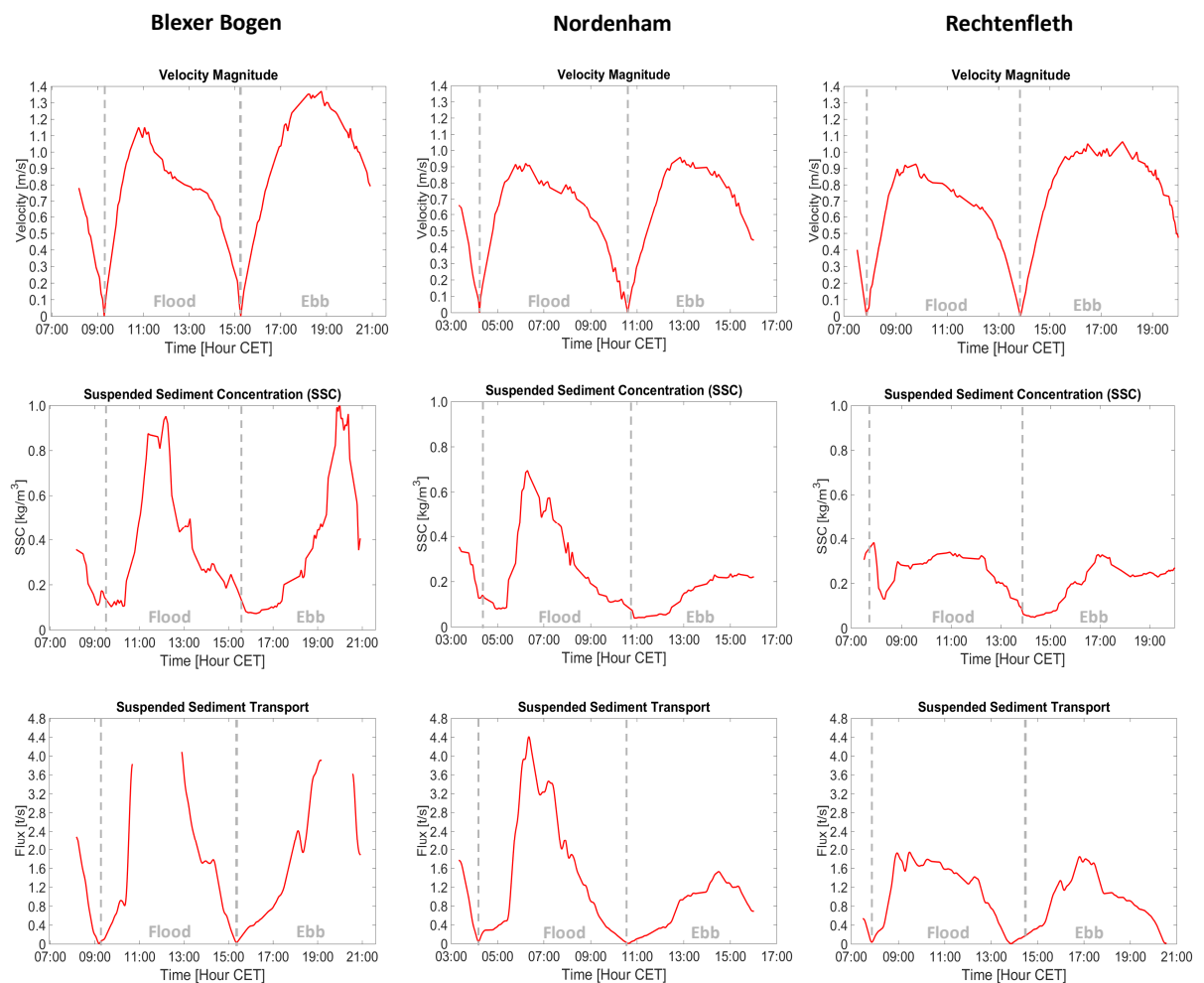
## 2 Untersuchungsmethoden

Die in der BAW umfangreich verfügbaren Naturmessdaten konnten hinsichtlich der forschungsrelevanten Größen erst in Ansätzen untersucht werden (AquaVision 2009-2011). Zunächst werden vorhandene wissenschaftliche Analysemethoden eingesetzt (AP1-3), um daraus Konzepte für die weitergehenden Untersuchungen (AP4-5) abzuleiten.

## 3 Ergebnisse

AP1-2 im Jahr 2013 abgeschlossen. Vorverarbeitung der Daten für weitergehende Analysen (AP3).

AP3-6: Die vertieften Analysen der ADCP-Kalibrierung mittels CTD, Trübungssensor, Partikelgrößen-detektor der vorliegenden 21 Ganztidenmessungen für die drei Ästuar Elbe, Weser und Ems aus den Jahren 2009-2011 zeigen, dass die notwendige Kalibrierung der Trübungsmessungen anhand der Wasserproben durchgehend statistisch stabile Korrelationen von  $r^2 \geq 0.88$  aufweisen. Die anschließende Kalibrierung des ADCP-Rückstreusignals zur Abschätzung der Schwebstoffgehalte anhand der Trübungsmessungen (frühere Abschätzung mittels einiger Wasserproben im Quersprofil) lässt eine statistisch stabilere Abschätzung der Schwebstoffgehalte zu. In den vorliegenden Datensätzen liegt im Mittel die maximal messbare suspendierte Sedimentkonzentration bei 1050 mg/l (Sättigung des Trübungssensors). Auf Basis dieser Erkenntnisse konnten die vorliegenden Datensätze aus den drei Ästuaren Elbe, Weser und Ems reprozessiert und somit hinsichtlich der Abschätzung der Schwebstoffgehalte und Volumentransporte verbessert werden. Bild 1 zeigt exemplarisch die aus den ADCP-Querprofilmessungen gewonnenen querschnittsgemittelten Strömungsgeschwindigkeiten, suspendierten Sedimentkonzentrationen sowie die Transporte der suspendierten Sedimente für drei Weserquerschnitte im Jahr 2009. Die höchsten Sedimentkonzentrationen treten während der späten Ebb- und frühen Flutphasen auf. Dies deutet darauf hin, dass das Zentrum der Trübungszone leicht flussaufwärts vom Querschnitt Blexer Bogen (km 61,1) ausgeprägt ist. Detaillierte ästuarübergreifende Analysen der Dynamik der suspendierten Sedimente werden im AP 5-7 erfolgen.



**Bild 1:** Querschnittsgemittelte Strömungsgeschwindigkeit, suspendierte Sedimentkonzentration und suspendierter Sedimenttransport basierend auf schiffsgestützten ADCP-Ganztidenmessungen für die Weserquerschnitte km 61,1 Blexer Bogen (24. Juni), km 56,7 Nordenham (19. Juni) und km 47,1 Rechtenfleth (22. Juni) im Jahr 2009.

Die Auswertung der reprozesierten ADCP-Querprofilmessungen zeigen, dass die durch die BAW verwendeten hydroakustischen und optischen Verfahren und Auswertemethoden zur Erfassung der Schwebstoffdynamik unter ästuarinen Randbedingungen auf einem hohen technischem Stand ist und den neuesten wissenschaftlichen Anforderungen entspricht. Die Abschätzung der suspendierten Sedimentfracht liefert für weite Bereiche der Ästulare belastbare Ergebnisse. Gleichwohl sind für Bereiche mit starker Tideströmung und hoher Trübung (suspendierte Sedimentkonzentration > 1050 mg/l), z. B. die barokline Wechselzone der Ästulare, die angewendeten Verfahren limitiert. In Zusammenarbeit mit dem Marum - Zentrum für Marine Umweltwissenschaften der Universität Bremen fließen die gewonnen Erkenntnisse in Parameterstudien der verschiedenen Größen wie Salinität, Temperatur, Korngröße und Sedimentkonzentration ein, woraus anschließend ein Messkonzept für hyperturbide Bereiche entwickelt wird. Als Resultat aus dieser Zusammenarbeit werden erste Testmessungen in der Ems im Jahr 2015 (AP5-7) stattfinden.

Das in AP1-3 speziell für schiffgestützte ADCP-Querprofilmessungen entwickelte Austauschformat basiert auf dem Unidata Network Common Data Format (NetCDF) der Climate & Forecast (CF) Metadata Konvention. Die CF-Konvention stellt in den Klima- und Ozeanwissenschaften seit Jahren den Standard für die Ablage und den Austausch von wissenschaftlichen Daten dar (CF-Conventions 2015). Mit der Datenablage in einem international anerkannten und abgestimmten Format kann effizienter eine Implementierung in die BAW-Modellsysteme sowie der Datenaustausch mit externen Partner wie der TU Delft oder dem Marum (Projektpartner) erfolgen.

Die Ablage der profilierenden, schiffgestützten ADCP-Messungen erfolgt im Trajectory Profile Feature Type (The National Oceanographic Data Center (NOOC) 2015), gemäß der CF-Konvention. Mit der definierten NetCDF Metadaten Schnittstelle können die bereits erhobenen als auch zukünftigen, komplexen und heterogenen Naturmessdaten effizienter für die Validierung der BAW-Modellsysteme verwendet werden. Damit steht nunmehr für die schiffgestützten 21 ADCP-Querprofilemessungen 2009-2011 ein Produkt zur Abschätzung der suspendierten Sedimentkonzentration und -transporte in den Ästuaren Elbe, Weser und Ems zur Verfügung. Zudem konnte ein reproduzierbarer Workflow von der Datenaufnahme, über die Prozessierung bis hin zur Ablage in NetCDF CF implementiert werden. Erste projektübergreifende Arbeiten innerhalb der BAW (Projekt: MorphoWeser, Netzplan-Nr.: A39550270223) zur Modellvalidierung über die räumliche und zeitliche Verteilung suspendierter Sedimente in der Trübungszone der Weser basieren bereits auf NetCDF-CF-Datenschnittstelle (vgl. Veröffentlichung Zorndt, A. et al. 2015).

Die dargelegten Ergebnisse (Datenpakete), entwickelten Methoden, Analysen und Softwareskripte werden aktuell detailliert dokumentiert und zunächst im BAWiki und später in einem Fachjournal veröffentlicht.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2014: (AP3-6) Definition und Aufbau einer NetCDF-Datenschnittstelle zur konsistenten Ablage der 21 schiffsgestützten ADCP-Querprofilemessungen. Bereitstellung und Integration der Schnittstelle in das BAW-Modellsystem.

Vertiefte Analysen der ADCP-Kalibrierung mittels CTD, Trübungssensor, Korngrößendetektor der vorliegenden Datensätze. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen, Reprozessierung der Querprofilmessungen, um die ersten Abschätzungen der Nettotransporte aus den deutschen Ästuaren Elbe, Weser, Ems zu verbessern.

Aus der Entwicklung von Beobachtungskonzepten der physikalischen Teilprozesse (AP4) ergibt sich neben einem ästuarübergreifenden Analyseansatz, dass ein Schwerpunkt der Arbeiten auf den hochkonzentrierten Suspensionen der Ems liegen wird.

Ferner werden die bisherigen Arbeiten und Ergebnisse detailliert dokumentiert, hausintern und im BAWiki (öffentlich) und in Fachzeitschriften und wissenschaftlichen Konferenzen veröffentlicht.

2015: (AP3, AP5-7) Weitere Planung und ggf. Durchführung entsprechender Messkampagnen in der Ems. Die wissenschaftliche Analyse spezieller Teilprozesse aus den jeweiligen Messkampagnen wird fortgeführt. Die Resultate werden auf Konferenzen und in Fachzeitschriften präsentiert und veröffentlicht. Basierend auf den Erkenntnissen wird ein Validierungsdokument (numerisch)

sche Modellergebnisse/ Naturmessungen) für die deutschen Hauptästuare (Elbe, Weser, Ems) erstellt. Im Anschluss wird ein zitierungsfähiger Abschlussbericht verfasst.

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2016.

## 5 Literatur

AquaVision (2009-2011): Suspended Sediment Measurements, *Reports on 7 field surveys conducted by commission of the Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW), Germany.*

CF-Conventions (2015): NetCDF CF Metadata Conventions. <http://cfconventions.org/>, letzter Zugriff: 30.01.2015.

NODC (2015): The National Oceanographic Data Center (NODC). NODC NetCDF Templates v1.1. <http://www.nodc.noaa.gov/data/formats/netcdf/v1.1/#templatesexamples>, letzter Zugriff: 30.01.2015).

## 6 Veröffentlichungen

Grünler, G., Maushake, C. (2013): Field Studies of Suspended Sediment Dynamics in Estuaries. Poster at the International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes (Intercoh) 2013. In: <http://ewisa.baw.de/publication/1097>.

Kösters, F., Grünler, S., Becker, M. (2014): Suspended Sediment Dynamics in the Mixing Zone - a Case Study from the Weser Estuary. Presentation at the 11<sup>th</sup> International Conference on Hydroscience & Engineering, Hamburg, Germany.

**Modulares System für Schelfmeere und Küsten (MOSSCO)****Netzplan-Nr.:** A39550270155**Projektleiter:** Dr. Frank Kösters, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Ästuarsysteme I (K2)**Bearbeiter:** Dr.-Ing. M. Hassan Nasermoaddeli**E-Mail:** Hassan.Nasermoaddeli@baw.de**1 Problemdarstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Im Rahmen des Forschungsprogramms „Forschung für Nachhaltigkeit (FONA)“ wurde in dem Forschungsauftrag „Küstenmeerforschung für Nord- und Ostsee“ die Notwendigkeit zum Aufbau eines modularen Modellsystems für die Küstenforschung als wesentlicher Punkt adressiert. Genau dieser Forderung kommt das BMBF geförderte Projekt „Modulares System für Schelfmeere und Küsten“ (MOSSCO) nach. MOSSCO ist ein Verbundprojekt des Helmholtz-Zentrums Geesthacht, Institut für Küstenforschung (HZG), des Leibniz-Instituts für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) und der BAW. Von der BAW wird das Teilprojekt „Anwendung für den Sedimenttransport: Die Rolle der Biologie“ durchgeführt, um bestehende Modellsysteme für die Abbildung des Bodens (Sedimenttransport, Deposition und Erosion), sowie Modelle der bodennahen (benthischen) Flora und Fauna für die Nutzung im integrierten Modellsystem vorzubereiten und zu implementieren.

Die heute im Küsteningenieurwesen eingesetzten Modellverfahren berücksichtigen zum Großteil keine biologischen Einflüsse sondern sind auf eine rein abiotische Betrachtungsweise ausgelegt. Insbesondere bei der Betrachtung des Transports suspendierter Sedimente stellt diese Entkopplung ein potenzielles Defizit der Ergebnisqualität dar, da die Beeinflussung biologischer Prozesse auf das Absetzverhalten suspendierter Sedimente nicht berücksichtigt wird. Hinzu kommt, dass die Erosion von Sedimenten maßgeblich durch biologische Parameter wie der Häufigkeit und der Wirkung von Makrofauna oder mikrobieller Stabilisierung der oberen Sedimentschicht beeinflusst sein können (z. B. Krumbein, 1995; Jacobs et al., 2011). Die Erosionseigenschaften werden heute zumeist nur durch eine statische Beschreibung der Rauheit an der Sohle beschrieben, prognostische Modelle sind derzeit nicht verfügbar. Diese möglichen Defizite sollen in einem voll gekoppelten Modell näher betrachtet und als neue Parametrisierungen in bestehende Verfahren integriert werden.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Die BAW kann mit diesem Teilprojekt ihre schon heute herausragende wissenschaftliche Kompetenz insbesondere im Hinblick auf die zunehmende Verzahnung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit den vielfältigen (öffentlichen und privaten) Planungsvorhaben im Ästuar- und Küstenbereich weiter ausbauen und somit die Beratungsqualität für die WSV weiter steigern. So werden die an den Universitäten und Großforschungseinrichtungen erarbeiteten Methoden direkt für die angewandte Forschung in der BAW genutzt und fördern die kontinuierliche Weiterentwicklung der Methoden und Verfahren. Die von der BAW im Projekt erarbeiteten und dokumentierten Ergebnisse werden für die WSV im Hinblick auf die Aufgaben des Sedimentmanagements und Wasserstraßenunterhaltung aufbereitet und zur Nutzung zur Verfügung gestellt. Somit bildet MOSSCO einen Baustein zur integrierten Betrachtung kohäsiver Sedimentdynamik und biogeochemischer Nährstoffzyklen. Dies ist bereits heute eine drängende Frage der WSV, deren Bedeutung in Zukunft noch weiter zunehmen wird.

**1.3 Untersuchungsziel**

Das Teilprojekt der BAW bearbeitet schwerpunktmäßig die Schnittstelle zwischen Wassersäule und Boden. Im Rahmen dieses Teilprojektes werden bestehende Modellsysteme für die Abbildung des Bodens (Sedimenttransport, Deposition und Erosion), sowie Modelle des Einflusses der bodennahen (benthischen) Flora und Fauna auf den Sedimenttransport für die Nutzung im integrierten Modellsystem vorbereitet und implementiert. Es ist notwendig dieses neu aufgebaute Modellsystem zunächst zu validieren, um es später für Fragestellungen der Wechselwirkung zwischen Biologie und Sediment



nutzen zu können. Das modulare Modellsystem soll dazu dienen die Wechselwirkung zwischen Biologie und Sediment näher zu untersuchen. Schwerpunkte bilden dabei zunächst 1D-Systemstudien zur biologisch beeinflussten Flokkulation kohäsiver Sedimente in der Wassersäule, sowie durch z. B. Algenauflage veränderte Erosionseigenschaften der Sedimente am Boden. Im nächsten Schritt soll die Erweiterung auf reale Systeme (3D) und die Bewertung der hinzugenommenen biologischen Prozesse für die Sedimentdynamik in Nord- und Ostsee erfolgen.

- Ziel 1: Aufbau und Validierung eines Geoökologiemoduls zur Nutzung im Rahmen des modularen Modellsystems
- Ziel 2: Beschreibung gekoppelter biologischer und sedimentologischer Prozesse für die Dynamik kohäsiver Sedimente im Flachwasserbereich und Ableitung möglicher Parametrisierungen (Publikation 1)
- Ziel 3: Quantifizierung des Einflusses benthischer Makrofauna und des Mikrophytobenthos für den Sedimenttransport (Publikation 2)

## 2 Untersuchungsmethoden

Der wesentliche Bestandteil des Projekts ist die Entwicklung und Anwendung numerischer Untersuchungsmethoden, dazu werden numerische Verfahren zur Simulation der Hydrodynamik, des Stofftransports und biogeochemischer Stoffkreisläufe eingesetzt. Im ersten Schritt wird eine geeignete Kopplungsstrategie der einzelnen Verfahren entwickelt. Für den Austausch zwischen Erdsystemkompartimenten (z. B., Benthos – Pelagial) wird das „Earth System Modeling Framework (ESMF)“ aus der Klimaforschung eingesetzt. Innerhalb eines Kompartiments erfolgt die Kopplung mittels des „Framework for Aquatic Biogeochemical Models (FABM)“.

Die Anwendbarkeit des Systems wird zunächst anhand von 1D Modellen gezeigt und für Systemstudien zur näheren Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung von Biologie und suspendiertem Sediment genutzt. Im Anschluss erfolgt die Erweiterung auf dreidimensionale Modelle. Mit einer bestehenden Modellkonfiguration für die Nord- und Ostsee werden zwei Referenzjahre berechnet, um die großräumigen Sedimenttransporte genauer zu untersuchen. Diese Untersuchungen werden durch die Analyse von bestehenden Messdaten im Sinne einer Modellvalidierung ergänzt.

## 3 Ergebnisse

**WP-A:** Zur Erweiterung der Methodik der Beschreibung von Benthoseffekten auf den Sedimenttransport wurde das Institut für Angewandte Ökologie (IfAÖ) beauftragt, die Sedimenttransport prägenden Makrofaunaarten für den Bereich der Deutschen Bucht zu identifizieren und nach Stand des Wissens (u. a. Darr et al, 2014 und Montserrat 2011) neu zu klassifizieren (IfAÖ, 2014). Die neue Klassifizierung dient als Grundlage für die bereits in MOSSCO implementierten Makrofaunamodelle.

**WP-B:** Abgeschlossen in 2013.

**WP-C:** Neben Zusammensetzung, Aufbereitung und Analyse der Messdaten an NOAH-Station C (Daten wurde vom Senckenberg-Institut und dem MARUM aus dem Projekt NOAH zur Verfügung gestellt) wurde eine umfangreiche Recherche nach verfügbaren Daten aus der Literatur durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass nur wenig brauchbare Datensätze vorhanden sind, in denen hydrodynamische, morphodynamische sowie für das Projekt notwendige biologische Daten gleichzeitig erfasst wurden. Darüber hinaus wurden Schwebstoffgehalte auf Basis von Sattelitendaten sowie das Sedimentinventar der Deutschen Bucht auf Basis des Aufmod-Projekts für MOSSCO im NetCDF Format aufbereitet.

**WP-D** Als Sensitivitätsstudie zur Schwebstoffdynamik des gekoppelten physikalisch-biologischen Modells wurden Rauheit des Bodens und Sinkgeschwindigkeit systematisch verändert und die Ergebnisse im Vergleich zu den Messstationen NOAH-C (Kurzzeitsimulation) und Helgoland (Langzeitsimulation) analysiert.

Als Verifikation des neu implementierten Sedimenttransportmoduls, wurde ein Massenbilanztest erfolgreich durchgeführt. Im nächsten Schritt wurde einen GOTM Testfall (tidal straing in Liverpool Bay, UK) herangezogen um die Validität des hydrodynamischen Modells im gekoppelten System zu prüfen. Die Strömung und Wasserstände konnten sehr gut reproduziert werden. Die Verifikation der Hydrody-

namik wurde durch einen Vergleich der mit MOSSCO (1D) simulierten Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten mit Messungen an der NOAH-Station-C gezeigt. Für die Validierung der Schwebstoffdynamik wurde auf einen stationären Kanalströmungstest (Rouse Profile) zurückgegriffen. Dabei handelt es sich um die Berechnung der vertikalen Sedimentkonzentrationsverteilung für nicht-kohäsive Sedimente. Die analytische Lösung konnte nahezu identisch abgebildet werden.

**WP-E** Die Plausibilität des biologischen Modells wurde anhand einer Sensitivitätsstudie über die Parametrisierung der biologischen Effekten auf die kritische Sohlschubspannung sowie die Erodierbarkeit überprüft. Hierzu wurde die Biomasse von Mikrophytobenthos und die Abundanz einer Art von Makrofauna (*Tellina fabula*) systematisch geändert. Die Ergebnisse zeigten wie erwartet eine erhöhte Schwebstoffkonzentration im Vergleich zu Simulationen ohne Berücksichtigung der biologischen Effekte (Nasermoaddeli, et.al, 2014a). Ähnliche Ergebnisse wurden am Beispiel der NOAH Station-C unter Berücksichtigung von Mikrophytobenthos und Makrofauna (hier: *Abra alba*) erzielt (Nasermoaddeli, et.al, 2014b), welche die Unabhängigkeit der Ergebnisse in Bezug auf die Randbedingungen bestätigen.

**WP-F:** Das MOSSCO Modellsystem wurde von 2D auf 3D erweitert. Dies stellte eine große Anforderung im Hinblick auf die Modellkopplung und insbesondere bereits gekoppelte Teilmodelle dar. In diesem Zusammenhang wurde auch der tiefgemittelte Ansatz für den Sedimenttransport auf ein 3D-Modell erweitert. Darüber hinaus wurde die Leseroutine für flächendeckende Daten angepasst. Im nächsten Schritt wird MOSSCO-3D für ein gekoppeltes Nordsee-Ostsee Set-up getestet.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

WP	Aufgabe	Jahr
F	Anwendung im 3D Fall: Quantifizierung der Rolle von Makrofauna für den Sedimenttransport; Quantifizierung der Rolle von Mikrophytobenthos für den Sedimenttransport	2014 / 2015
G	Berechnung von Sedimentbudgets und Vergleich mit Ergebnissen anderer Projekte (AUFMOD, PACE, WIMO)	2015
H	Analyse potentieller biologischer Effekte bzgl. Mikrophytobenthos / Biostabilisierung	2015
I	Test des modularen Austausches Geoökologiemodul (an/aus); Sensitivitätsanalysen zur Abbildung der Geoökologie	2015
J	Szenariorechnung mit voll gekoppeltem Geoökologiemodul; Synthese der Ergebnisse und 2. Publikation	2015 / 2016

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2016.

#### 5 Literatur

Montserrat, F. (2011): Estuarine ecosystem engineering: biogeomorphology in the estuarine intertidal, Dissertation, Echnical University Delft, Delft, Netherland.

Darr, Alexander; Gogina, Mayya; Zettler, Michael L.,(2014): Functional changes in benthic communities along a salinity gradient– a western Baltic case study., *Journal of Sea Research*,85, S(315-324), DOI: 10.1016/j.seares.2013.06.003

IfAö (2014): Biologische Beeinflussung des Sedimenttransportes: Aufbereitung zum Stand des Wissens. Endbericht. S.114.

#### 6 Veröffentlichungen

Nasermoaddeli, M.H., Lemmen, C., Hofmeister, R., Kösters, F. and Klingbeil, K. (2014a): The benthic geocology model within the modular system for shelves and coasts (MOSSCO), 11th International Conference on Hydroinformatics (HIC), New York City, USA

Nasermoaddeli, M.H., Kösters, F., Hofmeister, R., Lemmen, C., Wirtz, K.W. (2014b): First results of modelling benthos influence on sediment entrainment using a generic approach within the MOSSCO framework, 11 International Conference on Hydroscience and Engineering (ICHE),Hamburg, Germany

## **Verbesserung der Validität und der Prognosefähigkeit des morphodynamischen Verfahrens SediMorph – Phase 2**

**Netzplan-Nr.:** A39550370178

**Projektleiter:** Dr.-Ing. H. Weilbeer, Dipl.-Geoök. B. Fricke, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme II (K3)

**Bearbeiter:** Dipl.-Geoök. B. Fricke, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat K3

**E-Mail:** holger.weilbeer@baw.de; benjamin.fricke@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Fragen nach Veränderungen der Hydrodynamik, des Sedimenttransportregimes und damit auch nach einer zukünftigen morphodynamischen Entwicklung des Gewässers gehören auch im Küstenraum zu den primären Fragen, die im Zusammenhang mit veränderten Bedingungen, wie z. B. infolge von Baumaßnahmen oder infolge des Klimawandels, gestellt werden. Eine detaillierte und umfassende Kenntnis der Hydrodynamik und der Transportprozesse des Gewässers ist die wichtigste Grundlage für das Verständnis des Systems und somit eine unverzichtbare Voraussetzung für prognostische Aussagen.

Der Sedimenttransport unterliegt in einem natürlichen System aufgrund der Heterogenität der Sedimente und deren Transporteigenschaften einer starken räumlichen und zeitlichen Variabilität. Eine exakte Berechnung des natürlichen Sedimenttransportes und damit auch der Prognose einer morphodynamischen Entwicklung ist unmöglich. Modellansätze sind stets parameterbehaftet und analytische Lösungen gibt es nur für wenige idealisierte Systeme. Diese Aussagen gelten sowohl für dreidimensionale, kurzfristige und prozessorientierte Modelle als auch in zunehmendem Maße für vereinfachte Modelle, bei denen zugunsten des Prognosezeitraumes die räumliche und zeitliche Auflösung, die Intensität der Kopplung und die Komplexität der Modellierung reduziert werden.

Dennoch ist der Einsatz solcher Modelltypen für morphodynamische Fragestellungen erforderlich. Die Weiterentwicklungen der Modelltechnik und der Computerressourcen im letzten Jahrzehnt haben es ermöglicht, einen großen Abschnitt auf dem Weg von qualitativen hin zu quantitativen Aussagen zurückzulegen. Bei guter Datengrundlage und fachkundiger Modellierung können durchaus plausible Ergebnisse erzielt werden, die ein wichtiges Hilfsmittel bei der Beantwortung der oben genannten Fragestellung darstellen. Die Vertrauenswürdigkeit der Modellergebnisse muss aber weiter verbessert werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die zukünftige morphodynamische Entwicklung von Bundeswasserstraßen an sich und als Folge von Bau- oder Unterhaltungsstrategien oder als Folge des Klimawandels ist eine zentrale Frage des Verkehrswasserbaus. Die morphologische Entwicklung der Gewässersohle kann die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt gefährden, verursacht Baggerkosten und steht auch im Zentrum umweltrelevanter Fragestellungen, da z. B. Schadstoffe an Feinsedimente gebunden sind.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Mit Hilfe des FuE-Vorhabens soll die Zuverlässigkeit der morphodynamischen Modellprognosen gesteigert werden. Ein neues Bodenmodell, das eine bessere Repräsentation der natürlichen Variabilität eines Bodens vor allem in der Vertikale ermöglicht, soll entwickelt werden. Ausgehend von der Sedimentverteilung und der Zusammensetzung der deponierten Sedimente soll die vertikale Schichtung über die Einteilung in Bodenarten definiert werden.

## 2 Untersuchungsmethoden

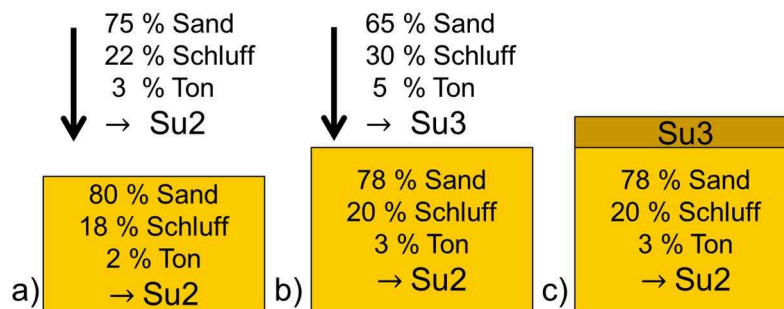
- Literaturrecherche
- Softwareentwicklung
- Numerische Modellierung

## 3 Ergebnisse

Im Mittelpunkt steht die Entwicklung eines stratigrafischen Bodenmodells zur detaillierten Abbildung von Sedimenttransportprozessen.

Aufbauend auf einer Literaturstudie wurde ein Konzept für einen Ansatz zur vertikalen Diskretisierung des Bodens erstellt. Die Diskretisierung erfolgt dabei nicht über räumliche Parameter wie z. B. feste Mächtigkeiten oder Tiefenvorgaben, sondern die Bildung von Schichten ist abhängig von Änderungen der Sedimentverteilung. Unterscheidet sich die Zusammensetzung des deponierenden Sediments ausreichend von der des oben anliegenden Sediments, wird eine neue Schicht eingerichtet. Dieses Prinzip ist in Bild 1 dargestellt.

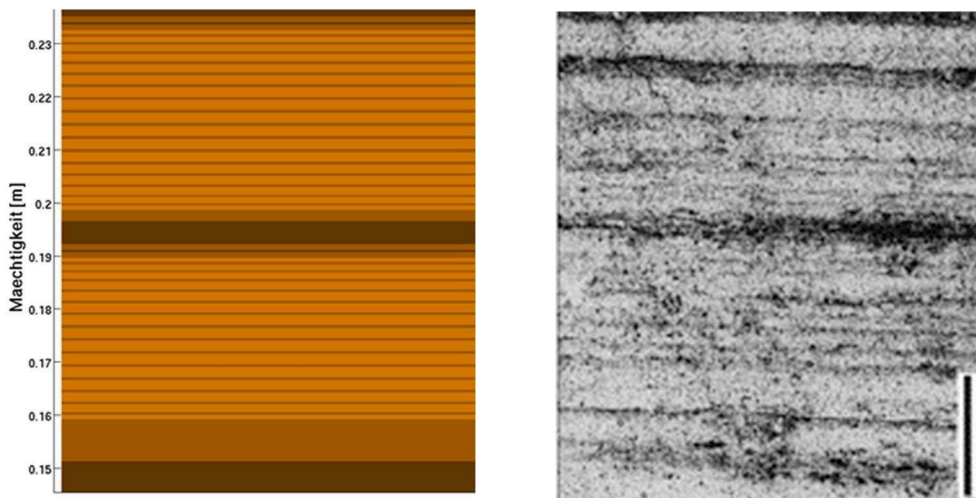
Ob die Unterschiede zwischen zwei Sedimentverteilungen ausreichend groß sind, wird über die Zuordnung von Bodenarten entschieden. Die Bestimmung von Bodenarten erfolgt über die Verteilung der Sedimentklassen Sand, Schluff und Ton.



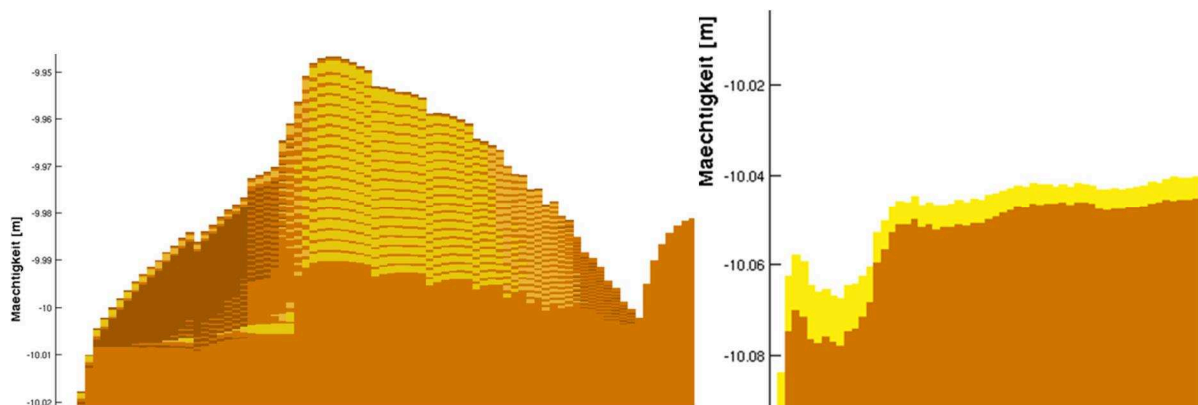
**Bild 1:** Entstehung von neuen Schichten: a) Deposition von Sedimenten, die sich in ihrer Zusammensetzung nur geringfügig von dem vorhandenen Material unterscheiden (Su2 = Bodenart leicht schluffiger Sand). b) Ablagerung in die bestehende Schicht ist erfolgt; Sedimentanteile des Depositionsflusses unterscheiden sich ausreichend stark (Su3 = mittel schluffiger Sand). c) Deposition erfolgt in neuer Schicht.

Diesem Konzept folgend wurde zunächst ein vertikales 1-D Bodenmodell in Matlab entwickelt. Das Modell ist in der Lage, die für die Morphodynamik in Ästuaren und Küstengebieten relevanten Prozesse abzubilden. Bild 2 zeigt die entstehende Schichtung während eines Nipp-Spring-Zyklus unter Depositionsbedingungen und das dabei abwechselnde Auftreten von feinen und groben Sedimenten, hervorgerufen durch unterschiedliches Erosions- und Sinkverhalten der Sedimente.

Nach den erfolgreichen Tests wurde das neu konzipierte Bodenmodell in SediMorph integriert und eine erste Arbeitsversion geschaffen. Mit dieser wurden komplexere Fälle untersucht, um das neue Modell auf bestehende Stärken und Schwächen zu testen. Erste Untersuchungen (s. Bild 3) zeigen vielversprechende Ergebnisse.



**Bild 2:** Links: Modellergebnisse des 1DV-Matlabmodells in einem vereinfachten Depositionssetting; Rechts: Bohrkern aus Untersuchungen an der Westküste Koreas (Quelle: Choi, 2000).



**Bild 3:** Links: Entstehung einer tidebedingten Schichtung im Längsprofil. Rechts: Entstehung einer Deckschicht unter Berücksichtigung einer Sedimentfraktion als Geschiebe im Längsprofil. Gelbe Schichten bestehen hauptsächlich aus sandigen Sedimenten, dunklere Schichten hauptsächlich aus feinerem Material.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

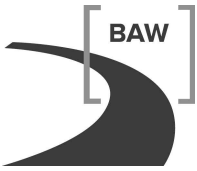
Es wird ein Ensemble an morphodynamischen Testfällen aus dem Labor und der Natur weiterentwickelt. Diese Testfälle sind unterschiedlicher Komplexität, so dass die Stärken und Schwächen des Modellverfahrens erkennbar werden. In einem iterativen Prozess zwischen Verbesserung des Modellverfahrens und Durchlaufen der Testfälle werden die Validität und die Prognosefähigkeit verbessert.

Allgemeine Aufgaben:

- a) Modellaufbau für ausgewählte Laborversuche
- b) Simulation und Analyse der Laborversuche
- c) Modellaufbau für ausgewählte Testfälle aus den Ästuaren
- d) Simulation und Analyse der Testfälle aus den Ästuaren
- e) Entwicklung und Integration neuer Ansätze
- f) Morphodynamische Validierung der Ästuarmodelle

Aufgaben Bodenmodell:

- 1) Literaturstudie zum Thema Strukturierung des Bodens
- 2) Entwicklung eines tiefenstrukturierten Bodenmodells



- 3) Implementierung des Bodenmodells in das Sedimenttransportmodell SediMorph
- 4) Tests mit ausgewählten Laborversuchen
- 5) Test am komplexen System (Elbe-Ästuar)

Zeitplan:

Jahr 2015: Unterpunkte 3, 4 und 5

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2015.

## **5 Literatur**

Choi, K.S., Park, Y.A. (2000): Late Pleistocene silty tidal rhythmites in the macrotidal flat between Youngjong and Yongjou Islands, west coast of Korea. *Marine Geology*, Elsevier, Vol. 167, pp. 231-241.

## **6 Veröffentlichungen**

Fricke, B., Malcherek, A. (2014): A stratigraphic soil model for coastal morphodynamics. In: *Proceedings of 11th International Conference on Hydrosience & Engineering (ICHE2014)*.

## **Interaktion von Größen des Sedimenttransports und der Wasserqualität in dreidimensionalen Ästuarmodellen**

**Netzplan-Nr.:** A39550370190

**Projektleiterin:** I. Holzwarth, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)

**E-Mail:** Ingrid.Holzwarth@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Untersuchungen der BAW zu Ausbau- und Erhaltungsmaßnahmen an den Ästuaren berücksichtigen zurzeit ausschließlich abiotische Größen. Aussagen zu biologisch stark beeinflussten Größen, wie etwa dem Nährstoff- und Sauerstoffhaushalt, werden auf Grundlage anderer Untersuchungen getroffen. Eine getrennte Betrachtung abiotischer und biotischer Parameter entspricht nicht den in der Natur herrschenden Bedingungen, da es zahlreiche Wechselwirkungen zwischen ihnen gibt, die ihre Konzentrations- und Transporteigenschaften nennenswert beeinflussen. Beispielsweise bestehen Schwebstoffe zu variierenden Anteilen aus anorganischem sowie lebendem und totem organischem Material und entsprechend ihrer Zusammensetzung besitzen sie unterschiedliche Eigenschaften. In Erweiterung zu den bisher an der BAW durchgeführten Untersuchungen müssen bei der Simulation biologischer und chemischer Prozesse Stoffumsetzungen berücksichtigt werden. Dieses kann durch Gewässergütemodelle geleistet werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Ein Untersuchungswerkzeug, das es erlaubt, gleichzeitig abiotische und biotische Größen zu betrachten, ermöglicht eine umfassende Analyse der komplexen, im Ästuar auftretenden Prozesse. Dadurch wird es perspektivisch möglich sein, anthropogene Eingriffe hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Wasserstands- und Strömungsverhältnisse, den Salz- und Sedimenttransport sowie Größen mit einem starken biologischen Einfluss (z. B. gelösten Sauerstoff) anhand konsistenter Datensätze zu ermitteln.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Langfristiges Ziel ist die gekoppelte Simulation abiotischer Größen mit biotischen Größen wie Phytoplankton und Mikrophytobenthos im Bereich der deutschen Küstenwasserstraßen.

Aus den vorangegangenen Arbeiten hat sich ergeben, dass DelWAQ (DELTA RES, 2013), als Modul zur Simulation der Gewässergüte geeignet ist, um in die Software-Umgebung der BAW eingegliedert zu werden. Die notwendigen technischen Arbeiten sind bereits definiert und begonnen worden. Sie müssen nun abgeschlossen werden, um ein Gewässergütemodell zunächst für das Ästuar der Elbe aufbauen zu können. Nach erfolgreicher Validierung eines Modells für die Elbe wird ein vergleichbares Modell für das Ästuar der Ems angestrebt.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Es werden zunächst Messdaten aus der Tideelbe analysiert um die relevanten Prozesse zu identifizieren. Auf Basis der so gewonnenen Erkenntnisse werden sukzessive numerische Modelle aufgebaut, beginnend mit wenigen Dimensionen und groben Auflösungen hin zu einem dreidimensionalen Modell mit einer hohen vertikalen und horizontalen Auflösung.

### **3 Ergebnisse**

#### **3.1 Messdaten Elbe**

Im Ästuar der Elbe wurden und werden Messungen zur Wasserqualität (WQ) durchgeführt. Im Rahmen des FuE-Projektes wurde eine Vielzahl der Messergebnisse bei den erhebenden Institutionen

erfragt bzw. aus öffentlich verfügbaren Datenportalen abgerufen. Diese Daten werden im geodata-Bereich der BAW Hamburg geprüft und abgelegt.

In 2014 sind insbesondere Messdaten vom landseitigen Modellrand (stromauf von Geesthacht) hinzugekommen. Die biochemischen Messungen an den Messstellen Cumlosen und Schnackenburg werden zwar ca. 120 km stromauf des Modellrandes erhoben, stellen binnenseitig aber die nächstliegenden kontinuierlichen Messungen. Die Messungen der beiden nahe beieinander liegenden Messstellen wurden miteinander verglichen und unter Zuhilfenahme von Einzelmessungen am Wehr Geesthacht zu Randwerten für das Elbmodell aufgearbeitet.

### 3.2 Programmtechnische Entwicklungen

Das Kopplungsmodul zwischen Untrim und Delwaq wurde zu einer Kopplung für 3D-Simulationen erweitert. Nach dem Auffinden und der Beseitigung eines relevanten Fehlers im Delwaq-Code für den z-Schichten-Modus sind 3D-Simulationen der Wasserqualität auf Basis von 3D-Simulationen der Hydrodynamik in Untrim möglich.

Eine Ertüchtigung der Deltares Visualisierungswerkzeuge ist nicht möglich, somit können 3D-Ergebnisse derzeit nicht visualisiert werden. Da in Delwaq die Möglichkeit fehlt, 2D-Ergebnisse aus 3D Rechnungen abzuspeichern, ist ein Arbeiten mit 3D-Systemen zurzeit nicht möglich. Die Lösung dieses Problems wird im Rahmen eines neuen FuE-Projektes angegangen.

Das Kopplungs-Modul wurde für die Ausgabe von Schwebstoffkonzentrationen erweitert, sodass es möglich ist, diese Größe als Summe aller Fraktionen bereits in der UnTRIM-Simulation zu berechnen und DelWAQ zur Verfügung zu stellen

### 3.3 DelWAQ-Modellaufbau schematische Elbe

Aufgrund der fehlenden Visualisierungsmöglichkeiten von dreidimensionalen Ergebnissen, wurden Modelle mit schematischen Geometrien für die Elbe aufgebaut und im 1D und 2D – Modus modelliert. Systemstudien hinsichtlich des Einflusses der Hydrodynamik auf die Wasserqualitätsgrößen, sowie Sensitivitätsstudien zum Einfluss unterschiedlicher Parameter der Konfiguration des Wasserqualitätsmodells auf die Sauerstoffkonzentration wurden durchgeführt.

Es wurde eine Delwaq-Modellkonfiguration erarbeitet, die es ermöglicht die grundsätzlichen jahreszeitlichen Entwicklungen des Sauerstoffgehaltes in der Tideelbe in Modellen mit schematischen Geometrien zu simulieren, siehe Bild 1.

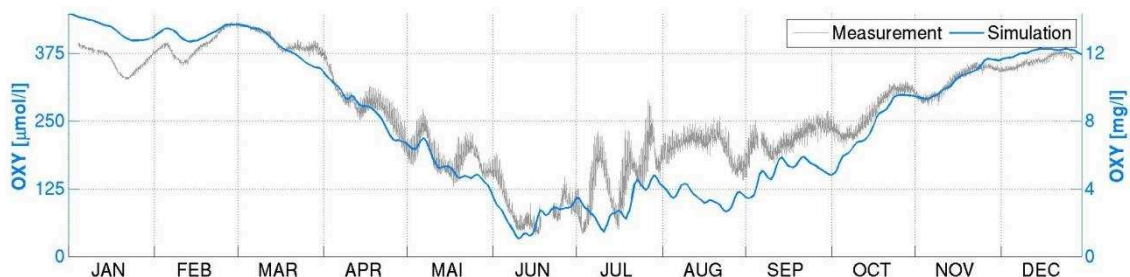


Bild 1: Vergleich der Konzentration des gelösten Sauerstoffs zwischen der Messung in Seemannshöft (WGMN Hamburg) und der entsprechenden Position im Modell (km 43,5) für das Jahr 2011.



#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das Arbeitsprogramm bis zu einer validierten Version eines Wasserqualitätsmodells der Tideelbe erstreckt sich über 31 Monate. Die Dokumentation der Arbeiten und Ergebnisse ist dabei eine Daueraufgabe und im Arbeitsprogramm nicht separat aufgeführt.

2015: Erstellung des Abschlussberichts

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2015.

#### 5 Literatur

Deltares (2013): D-Water Quality Process Library Description – Technical Reference Manual. Delft, The Netherlands

Casulli, V., Stelling, G.S. (2010): Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows. *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 67(4): 441–449

#### 6 Veröffentlichungen

Holzwarth, I. (2013): Coupling of Untrim2 and DelWAQ – Progress and first results. Vortrag, Untrim Users Meeting, Trento

Holzwarth, I. (2013): (Modelling) Biogeochemical Processes in the Elbe Estuary. Vortrag in der Seminarreihe der Abteilung Ökosystemmodellierung am Helmholtz-Zentrum Geesthacht

Holzwarth, I. (2014): Modeling accumulation in a schematic estuary. Vortrag in der Seminarreihe der Abteilung Ökosystemmodellierung am Helmholtz-Zentrum Geesthacht

Holzwarth, I. (2014)\_ Progress in Untrim<sup>2</sup> – Delwaq. Vortrag, Untrim Users Meeting, Trento

Holzwarth, I. und Hesse, R. (2014): Determinants of biogeochemical cycling in the Elbe – A model study. Poster. Workshop on Multiple Stable States in Estuaries. TU Hamburg-Harburg

## Weiterentwicklung der Methoden zur Analyse von Simulationsergebnissen

**Netzplan-Nr.:** A39550370200

**Projektleiter:** Dr.-Ing. G. Lang, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Ästuarsysteme II (K3)

**E-Mail:** guenther.lang@baw.de

### 1 Problemdarstellung und Ziel

#### 1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Mathematische Verfahren wie *UNTRIM* und *UNTRIM*<sup>2</sup> (mit *SubGrid*) ermöglichen die numerische Simulation vieler für das Tidegebiet bedeutsamer physikalischer Prozesse [Casulli, V., 2008], [Casulli, V., Stelling, G. S., 2010]. Hierzu zählen u. a. die Ausbreitung der Tidewelle, der Wechsel von Ebbe- und Flutstrom, der Transport von Salz, Wärme oder Schwebstoffen im Wasserkörper, der sohlnahe Sedimenttransport, sowie der Austausch von Sedimenten zwischen Wasserkörper und Boden (Deposition und Erosion) zusammen mit der daraus resultierenden Veränderung der Morphologie.

In der Regel werden die Berechnungsergebnisse, beispielsweise Wasserspiegelauslenkung, Strömungsgeschwindigkeit und Salzgehalt, in äquidistanten Zeitabständen (z. B. alle 10 Minuten) in Dateien geschrieben. Diese *synoptischen* Datensätze können im Anschluss an die Simulation *visualisiert*, zu *Animationen* zusammengefasst oder weitergehend *analysiert* werden.

Wichtige Fragen zu den Konsequenzen anthropogener Eingriffe in das Tidegebiet, oder zu den Auswirkungen natürlicher Veränderungen (z. B. säkularer Meeresspiegelanstieg) auf das Systemverhalten, können in dem von hoher zeitlicher und räumlicher Variabilität geprägten Tidegewässern nicht, oder nur unzureichend durch ausschließliche Verwendung synoptischer Datensätze beantwortet werden. Hier bedarf es einer weiter gehenden Analyse der Simulationsergebnisse.

Derartige Analysemethoden werden seit Anfang der 1990er Jahre intensiv und erfolgreich in vielen Projekten eingesetzt. Sie sind unverzichtbarer Bestandteil praktisch aller für die WSV durchgeführten Arbeiten sowie verschiedener Forschungsprojekte. Allerdings bestehen folgende Beschränkungen:

- Es können nur Daten an den Knoten des Berechnungsgitters analysiert werden.
- Die Daten müssen in dem Dateiformat BDF (Binäres Daten Format) vorliegen, welches ausschließlich in der BAW benutzt wird.
- Eine Analyse von Daten mit *SubGrid* (HN-Verfahren *UNTRIM*<sup>2</sup>) ist nicht möglich.
- Die Softwarearchitektur der Analyseprogramme ist „in die Jahre gekommen“.
- Die Laufzeit der Analyseprogramme ist teilweise (zu) lang.
- Kenngrößen analog zu den in der Meteorologie benutzten *klimatologischen Statistiken* - also auf die Zeiteinheiten Tag, Monat, Quartal, Jahr, klimatologische Periode bezogene Größen – werden für „unsere“ Größen Wasserstand, Strömung usw. derzeit nicht berechnet.

#### 1.2 Bedeutung für die WSV

Die Berechnung von Kenngrößen aus den Ergebnissen mathematischer Verfahren ist integraler und daher unverzichtbarer Bestandteil praktisch aller für die WSV in Bezug auf Fragestellungen an den Seeschiffahrtsstraßen in der BAW durchgeführten Untersuchungen.

Bei den berechneten Kenngrößen handelt es sich in vielen Fällen um die in DIN 4049-3 Hydrologie definierten Größen. Daher sind die aus den Simulationsergebnissen abgeleiteten Kenngrößen allgemein bekannt, verständlich, und von unmittelbarem Nutzen für die Projektpartner in der WSV. Aber auch Dritte, beispielsweise externe Gutachter, die im Rahmen von Planfeststellungsverfahren für die WSV tätig sind, bauen ihre Gutachten zu einem guten Teil auf den von der BAW berechneten Kenngrößen auf.

In dem FuE-Projekt „UnTRIM SubGrid-Topografie“ (A39550370150) wurde das mathematische Verfahren UnTRIM<sup>2</sup> eingehend erprobt. Um UnTRIM<sup>2</sup> sinnvoll einsetzen zu können, müssen die Analysemethoden für die SubGrid-Technologie (SGT) erweitert werden.

### 1.3 Untersuchungsziel

Überarbeitung vorhandener und Neuentwicklung fehlender Methoden zur Analyse von Simulationsergebnissen:

- Verbesserung der Softwarearchitektur – konzeptioneller Entwurf (**WP1**).
- Verwenden eines international gängigen Datei- und Metadatenstandards (**WP2**).
- Re-Integration der Analyse für knotenorientierte Daten (**WP3**).
- Erweiterung der Analyse für nicht knotenorientierte Daten: Kanten, Polygone, Zellen und Zellen-seitenflächen (**WP4**).
- Erweiterung der Analyse für Daten mit SubGrid (HN-Verfahren UNTRIM<sup>2</sup>) (**WP5**).
- Reduzieren der Laufzeit (**WP6**).
- Integration neuer Analysemethoden (**WP7**).

### 2 Untersuchungsmethoden

Um die unter 1.1 aufgezählten Defizite beseitigen und die neuen Ziele erreichen zu können, muss zunächst ein konzeptioneller Entwurf für die neuen Datenanalyse-Programme erstellt werden. Teilweise müssen die Definitionen der Analysegrößen überarbeitet werden, um die aus der SubGrid Technologie resultierenden Anforderungen berücksichtigen zu können

### 3 Ergebnisse

#### Arbeitspaket WP1

Die Software wird in Fortran95 entwickelt. Zur besseren Strukturierung werden Module eingesetzt. Module, die von mehreren Anwendungen genutzt werden können, werden in Paketen zusammengefasst. Die Berechnung der Kenngrößen wird über externe Konfigurationsdateien gesteuert. Neue Kenngrößen können damit häufig alleine durch Erweiterung der Konfigurationsdatei hinzugefügt werden.

#### Arbeitspaket WP2

In Zusammenarbeit mit *Deltares* (Delft) wurde das NetCDF Dateiformat zusammen mit dem CF Metadatenstandard für die Speicherung der Daten und Metadaten ausgewählt. Hierbei wurde CF für Daten auf unstrukturierten Gitternetzen erweitert. NetCDF und CF sind international weit verbreitet. Die wesentlichen Aspekte sind ausführlich in dem BAWiki dokumentiert (siehe „Veröffentlichungen“).

#### Arbeitspakete WP3, WP4 und WP5

Das in Entwicklung befindliche Programm NCANALYSE kann NetCDF Dateien mit knoten-, kanten- sowie polygonorientierten Daten lesen und analysieren. Bislang wurden die Tide- sowie Langzeit-Kennwerte des Wasserstands, der Strömungsgeschwindigkeit und des Salzgehalts (re-) implementiert. Daten mit SubGrid werden unterstützt.

Das Programm NC PLOT kann Daten mit und ohne SubGrid visualisieren (siehe Bild 1). Darüber hinaus hat die Firma smile consult (Hannover) das Visualisierungsprogramm DAVIT für CF NetCDF Daten erweitert.

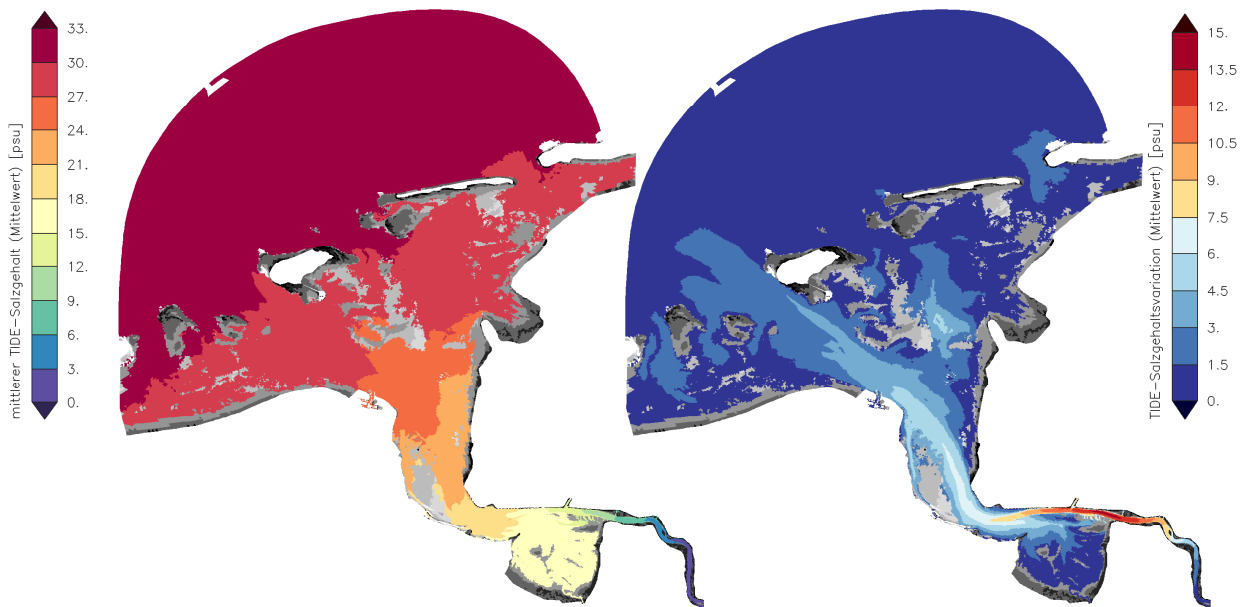
#### Arbeitspaket WP6

Das Analyseprogramm NCANALYSE wurde mit OpenMP und MPI parallelisiert.

#### Arbeitspaket WP7

Neue Kenngrößen für den Transport von Wasser, Salz, Wärme, Schwebstoff werden berechnet. Mit dem Programm NCAGGREGATE können Daten für Kontrollvolumina aggregiert werden. Die MATLAB *Stand-Alone* Anwendungen INSPECT\_CONTROL\_VOLUMES und DISPLAY\_CONTROL\_VOLUMES ermöglichen eine weitergehende Auswertung der aggregierten Daten.

Alle im Rahmen des Projekts entwickelten Programme stehen in PROGHOME (Software-Sammlung der BAW DH) allgemein zur Verfügung.



**Bild 1:** *Mittelwert (links) sowie Variation (rechts) des Salzgehalts in einer Tide (jeweils Mittelwert für alle Tiden des Analysezeitraums) für das Ems-Ästuar. Die Analyseergebnisse wurden mit NCANALYSE berechnet und mit NCPLLOT aus einer CF NetCDF Datei importiert und visualisiert. In den in grau dargestellten Gebieten kann nicht für jede Tide ein Kennwert berechnet werden. Deshalb werden dort keine Mittelwerte für den Analysezeitraum berechnet.*

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015: WP4, **WP5**, **WP7**.

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2015.

#### 5 Literatur

Casulli, V., Stelling, G. S. (2010): Semi-implicit sub grid modelling of three-dimensional free-surface flows. International Journal for Numerical Methods in Fluids, Band 67, Heft 4, 441 – 449, Okt. 2011.  
 Casulli, V. (2008): A high resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. International Journal for Numerical Methods in Fluids, Band 60, Heft 4, 391 - 408.  
 Sehili, A., Lang, G. and Lippert, C. (2014): High-resolution subgrid models: background, grid generation and implementation, Ocean Dynamics, Band 64, Heft 4, 519 – 535.

#### 6 Veröffentlichungen (BAWiki und Internet)

- 1.) [http://www.baw.de/methoden/index.php5/Analyse\\_der\\_Berechnungsergebnisse](http://www.baw.de/methoden/index.php5/Analyse_der_Berechnungsergebnisse).
- 2.) <http://www.baw.de/methoden/index.php5/NetCDF>.
- 3.) <http://www.baw.de/methoden/index.php5/NCAGGREGATE>.
- 4.) <http://www.baw.de/methoden/index.php5/NCANALYSE>.
- 5.) <http://www.baw.de/methoden/index.php5/NCPLLOT>.
- 6.) [http://www.baw.de/methoden/index.php5/INSPECT\\_CONTROL\\_VOLUMES](http://www.baw.de/methoden/index.php5/INSPECT_CONTROL_VOLUMES).
- 7.) [http://www.baw.de/methoden/index.php5/DISPLAY\\_CONTROL\\_VOLUMES](http://www.baw.de/methoden/index.php5/DISPLAY_CONTROL_VOLUMES).

## **Verbesserung von Methoden und Verfahren der BAW zur Entwicklung und belastbaren Beurteilung von Maßnahmen zur Reduzierung des Schwebstofftransportes in die Unterems**

**Netzplan-Nr.:** A39550370211

**Projektleiter:** Dr. rer. nat. N. Winkel, Wasserbau im Küstenbereich, Ästuarsysteme II (K3)

**Bearbeiterin:** Dipl.-Ing. M. Naulin, Wasserbau im Küstenbereich, Ästuarsysteme II (K3)

**E-Mail:** norbert.winkel@baw.de, marie.naulin@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Das Emsästuar ist ein ausgeprägtes flutstromdominantes System. Dies führt durch den stromaufgerichteten Schwebstofftransport zu einer erheblichen Verschlickung der Unterems. Um Maßnahmen zur Reduzierung des Schwebstofftransportes in die Unterems zu untersuchen und belastbar zu beurteilen, sollen Methoden und Verfahren der BAW im Rahmen dieses FuE-Projekts weiterentwickelt und verbessert werden. Basierend auf den Ergebnissen des Aktionsprogramms Ems (BAW, 2010) sollen die dafür notwendigen Untersuchungen mit den hydrodynamisch morphologisch numerischen Modellen der BAW durchgeführt werden. Das Projekt umfasst folgende Forschungsschwerpunkte:

- Es sollen wasserbauliche Maßnahmen zur Reduzierung des stromaufwärtsgerichteten Schwebstofftransportes sowie der Verschlickung der Unterems entwickelt und objektiv eingeschätzt werden. Hierfür sind verschiedene mögliche Lösungsvarianten mit dem HN-Modell UnTRIM, welches mit dem numerischen Sedimenttransportmodell SediMorph gekoppelt wird, zu untersuchen und soweit möglich in ihrer Wirksamkeit zu optimieren.
- Die entwickelten wasserbaulichen Maßnahmen umfassen zudem hydraulische Querbauwerke deren Wirkung im Nahbereich durch das UnTRIM-Modell unter bestimmten Bedingungen nicht ausreichend physikalisch (und numerisch) genau berechnet werden kann. Hierfür sollen ggf. Modelle, die die lokale Wirkung von Bauwerken auf die Hydrodynamik adäquat berücksichtigen können, zur Absicherung der UnTRIM-Ergebnisse herangezogen werden.
- Die numerischen Modelle UnTRIM und SediMorph unterliegen einer ständigen Weiterentwicklung und Optimierung. Neue oder überarbeitete Modellansätze, wie z. B. zur Modellierung der Turbulenz oder der Sinkgeschwindigkeit (konzentrations- und turbulenzabhängig), sowie weitere Modellverfahren, wie z. B. Delft3D, sollen überprüft werden. Auch die Wechselwirkung zwischen Wasserkörper, Flüssigschlick und (fester) Sohle ist ein entscheidender Prozess für die Hydro-, Schwebstoff-, und Morphodynamik der Unterems. Mit dem im KFKI-Forschungsvorhaben entwickelten Flüssigschlick-Modell MudSim (Wehr, 2012) sollen hierfür weitere Analysen sowie eine Integration der Software in die Programmumgebung der BAW erfolgen.
- Untersuchungen zu den Folgen eines Klimawandels wurden in den Forschungsprojekten KLIWAS (Seiffert et al., 2014) und KLIMZUG-Nord bei der BAW durchgeführt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sich sowohl durch einen Meeresspiegelanstieg als auch durch veränderte Abflussverhältnisse die Unterhaltungssituation der Schifffahrtsstraßen in den Ästuaren weiter verschlechtern wird. Deswegen sollten Lösungsvarianten hinsichtlich dieser möglichen Veränderungen geprüft werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Bedeutung des Sedimentmanagements ist in den letzten Jahren in allen Ästuaren der Deutschen Bucht gewachsen. Aufgrund ihrer relativ hohen Schwebstofffracht stellt die Ems hierbei eine besondere Herausforderung dar und bietet somit ein repräsentatives Ästuarsystem zur Erforschung der Sedimentdynamik. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen in zukünftige Projekte einfließen und auch auf andere Ästuar übertragen werden, somit ergibt sich folgende Bedeutung für die WSV:

- Regelmäßig entstehen an der Ems hohe Kosten aufgrund von Baggerungen, die es zu reduzieren gilt. Die Wirkungsweise und der Wirkungsgrad verschiedener Lösungsvarianten sollen untersucht, eingeschätzt und beurteilt werden. Die Ergebnisse bilden eine wichtige Grundlage für zukünftige Untersuchungen und Ziele im Rahmen des „Masterplans Ems 2050“.
- Die Weiterentwicklung und Verbesserung der in diesem Vorhaben eingesetzten Methoden und Verfahren werden auch in anderen WSV-Projekten zukünftig nutzbar sein.

- Die Qualitätssicherung der Erkenntnisse aus Simulationsdaten ist grundlegend für gutachterliche Aussagen der BAW. Dafür ist es notwendig, Defizite/Unzulänglichkeiten der einzelnen Untersuchungsmethoden mit zusätzlichen Methoden (hier ein Bauwerks-Modell) auszugleichen.
- Das erhöhte Vorkommen von Fluid Mud und hochkonzentrierten Schlicksuspensionen in der Ems ist weiter zu untersuchen, um Fragestellungen zur Entwicklung und Optimierung von Unterhaltungsstrategien, zur Wechselwirkung und Beeinflussung der Gewässergüte sowie der nautischen Sohle beantworten zu können.
- Die Auswirkungen eines Klimawandels auf die Unterhaltungssituation in der Unterems sollen analysiert und möglichst reduziert werden.

### 1.3 Untersuchungsziel

Es ergeben sich folgende Untersuchungs- bzw. Forschungsschwerpunkte:

- Entwicklung und Optimierung wasserbaulicher Maßnahmen zur Reduzierung des stromauf gerichteten Schwebstofftransports sowie der Reduzierung der Verschlickung der Unterems (**WP1**).
- Zur Absicherung der Modellergebnisse im Nahbereich der entwickelten wasserbaulichen Maßnahmen (z. B. Querbauwerk) sollen die Gültigkeit der Modelle überprüft und ggf. Bauwerks-Modelle eingesetzt werden (**WP2**).
- Die Wechselwirkung zwischen den Schwebstoffen im Wasserkörper und der Bildung hochkonzentrierter Schlicksuspensionen bis hin zu Fluid Mud ist in der Unterems ein nicht zu vernachlässigender physikalischer Prozess. Neu integrierte Modellansätze, beispielsweise zur Modellierung der Turbulenz oder der Sinkgeschwindigkeit (konzentrations- und turbulenzabhängig), um die Sediment- und Schwebstoffdynamik naturnäher zu prognostizieren, sollen angewandt werden. Langfristig wird die Entwicklung und Integration des Flüssigschlick-Modells MudSim in die vorhandene Simulationssoftware angestrebt (**WP3**).
- Prüfung der Wirkung der im Rahmen des FuE-Projekts entwickelten wasserbaulichen Maßnahmen sowohl bei Extremereignissen (Sturmflut, Oberwasserzufluss) als auch bei möglichen Folgen eines Klimawandels (z. B. Meeresspiegelanstieg) (**WP4**).

## 2 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungen werden mit hydrodynamisch morphologisch numerischen Modellen (UnTRIM mit SediMorph und Delft3D) sowie teilweise mit dem Flüssigschlick-Modell (MudSim) durchgeführt.

## 3 Ergebnisse

### Arbeitspakt WP1: Wasserbauliche Maßnahmen

Es wurde eine Übersicht möglicher wasserbaulicher Maßnahmen zur Schwebstofffrachtreduzierung erstellt (Bild 1). Zu diesen Maßnahmen zählen u. a. eine Verlängerung des Emsästuars, eine Sohlschwelle mit/ohne Wehrsteuerung sowie Tidepolder. Für die möglichen Lösungsvarianten erfolgte eine Simulation (UnTRIM und SediMorph) und Analyse. Die Wirkung zur Reduzierung des Schwebstofftransports in die Unterems wurde dokumentiert. Weiterhin wurde die technische Machbarkeit einer Simulation von beweglichen Elementen einer Sohlschwelle, d. h. eine Wehrlegung, erfolgreich geprüft und erste Szenarien für eine mögliche Wehrsteuerung analysiert.

### Arbeitspakt WP2: Modellierungen des Nahbereichs von Wasserquerbauwerken

Es wurde eine Road-Map erstellt, um die Eignung bzw. Nicht-Eignung des BAW-Modells zur Prognose der Hydrodynamik im Nahbereich von Querbauwerken wie der Sohlschwelle zu untersuchen und eine Abschätzung und Bewertung der Aussagefähigkeit der Simulationsergebnisse zu erzielen.

### Arbeitspakt WP3: Systemstudien, Modellentwicklung und -optimierung

Ein Modellaufbau und eine erste Kalibrierung eines Modells des Emsästuars wurden mit Delft3D durchgeführt.

Für die Erstellung eines Flüssigschlick-Modells der Unterems erfolgten ein Modellaufbau und eine erste Kalibrierung mit MudSim. Weiterhin wurde mit der Integration von MudSim in die vorhandene Simulationssoftware der BAW begonnen und die Ausgabe der Simulationsergebnisse im NetCDF CF Format ermöglicht.

Arbeitspakt WP4: Extremereignisse und Klimawandel

Es erfolgte eine Untersuchung möglicher Szenarien eines Klimawandels (Meeresspiegelanstieg und niedrige Abflussverhältnisse).

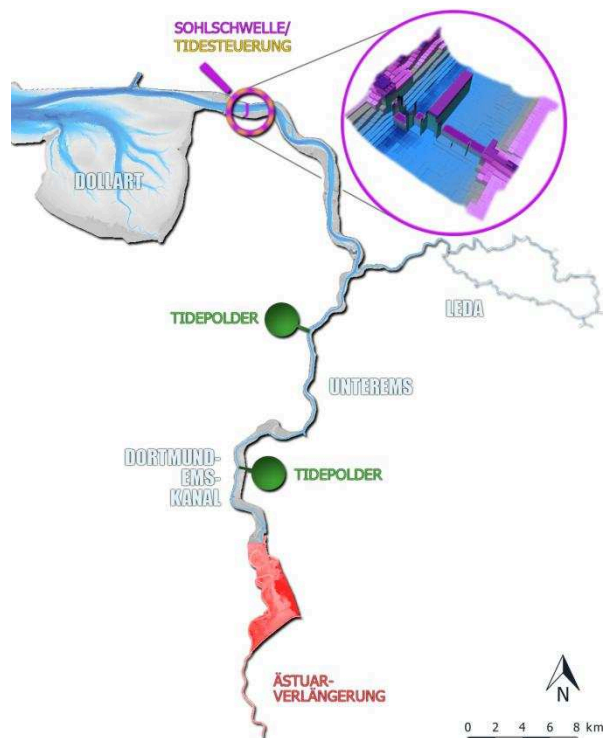


Bild 1: Mögliche wasserbauliche Maßnahmen zur Reduzierung des Schwebstoffeintrags in die Unterems.

**4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2014/2015: **WP 4**

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2015.

**5 Literatur**

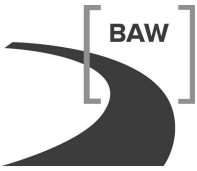
BAW (2010): Aktionsprogramm des Bundes zur Reduzierung seines Unterhaltungsaufwandes und der Minimierung der Verschlickung der Unterems – Gutachten zur vertieften Wirkungsanalyse. Gutachten, BAW-Nr. A3955 03 10143, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. Unveröffentlicht.

Wehr, D. (2012): An Isopycnal Numerical Model for the Simulation of Fluid Mud Dynamics; Dissertation; Mitteilungen Institut für Wasserwesen, Heft 115, Universität der Bundeswehr München, 228 S.

Seiffert, R., Hesser, F., Büscher, A., Fricke, B., Holzwarth, I., Rudolph, E., Sehili, A., Seiß, G., Winkel, N. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Küste und die Ästuar. Mögliche Betroffenheiten der Seeschiffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports - Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02

**6 Veröffentlichungen**

Jürges, J. (2013): Grundsatzuntersuchung zur Verlängerung des Emsästuars, Tagungsband BAW-Kolloquium, Projekte und Entwicklungen für aktuelle Fragestellungen im Küstenwasserbau, 19.09.2013, Hamburg



- Weilbeer, H.; Jürges, J., Wehr, D. (2013): Hydrodynamic and Sediment Transport Characteristics in the Ems-Dollart Estuary – An Insight into the Daily Work of BAW, Ems-Schelde-Workshop, 14.-15.02.2013, Delmenhorst
- Weilbeer, H.; Naulin, M.; Jürges, J. (2014): System Behavior of the Ems-Dollard-Estuary and Effectiveness of Selected Measures - Outcome of numerical model studies, Ems-Schelde-Workshop, 13.-14.02.2014, Antwerpen



**Resilience-Increasing Strategies for Coasts - toolKIT (RISC-KIT)****Netzplan-Nr.:** A39550370213**Projektleiter:** Dr. rer. nat. G. Seiß, Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme II (K3)**E-Mail:** guntram.seiss@baw.de**1 Problemdarstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Aktuelle und historische extreme Hochwasserereignisse mit niedriger Häufigkeit haben die Risiken aufgezeigt, denen exponierte Küstenregionen in Europa ausgesetzt sind. Risiko kann als Produkt aus der Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses und seiner Konsequenzen verstanden werden. Berücksichtigt man die Auswirkungen des Klimawandels, werden beide Faktoren in der Zukunft nach heutigem Wissenstand zunehmen.

Die Konsequenzen eines Flutereignisses setzen sich aus der Exponiertheit und der Dichte der Besiedelung und Bebauung zusammen. Letztere wächst mit der wirtschaftlichen Entwicklung einer Region. Die Empfindlichkeit einer Region steigt zudem, wenn beispielsweise unangemessene Bauweisen verwendet werden. Durch indirekte Zusammenhänge wirken sich Flutschäden auch auf das Hinterland und dessen Ökonomie aus.

Der Anstieg des Risikos entlang der Küsten erfordert eine Neubewertung der Katastrophenvorsorge und Risikomanagementstrategien (disaster risk reduction, DRR) und eine neue Mischung aus Prävention (z. B. Deichschutz), Minderung (z. B. Begrenzung der Besiedelung hochwassergefährdeter Gebiete) und Vorsorgemaßnahmen (z. B. Frühwarnsysteme (EWS)). Bereitstehende Gelder aus Hochwasserversicherungen können zu einer schnelleren Erholung der betroffenen Regionen führen.

Auch sinkende öffentliche Budgets und eine wachsende Wertschätzung des ökologischen Wertes der Küstenregion machen eine Neubewertung von Ansätzen zur Risikoreduktion erforderlich. Hochwasserschutzmaßnahmen und DRR-Strategien müssen sich im Einklang mit Umweltbelangen, wirtschaftlichen Nutzungen und Tourismus bewegen.

RISC-KIT ist ein EU-Forschungsprojekt unter FP7 (Grant Agreement Number 603458). In RISC-KIT soll DRR als integrierte Kette von Aktionen betrachtet werden. Diese Kette beinhaltet das Verständnis der gegenwärtigen und historischen Situation im Kontext mit einer Region, die Beurteilung des Küstenrisikos für gegenwärtige und zukünftige Gefährdungswahrscheinlichkeiten, Identifizierung kritischer (Hot-Spot-) Bereiche höheren Risikos, der Gestaltung von DRR-Plänen einschließlich geeigneter Prävention, Eindämmung von Risiken und Vorsorgemaßnahmen (wie EWS), um die Risiken zu reduzieren und den Aufbau von Vertrauen und gesellschaftlicher Akzeptanz für solche Maßnahmen. Auf diese Weise kann eine wirksame Katastrophenvorsorge mit einer starken gesellschaftlichen Basis erreicht werden und wird Teil der Kultur. Die Entwicklung von Methoden und Werkzeugen, um Risiken zu verringern und die Widerstandsfähigkeit der Küstenregionen zu erhöhen, erfordert einen interdisziplinären Ansatz. Durch das Zusammenwirken der 18 Projektpartner- aus unterschiedlichen Küstenregionen entsteht ein Wissensaustausch über das Thema. Folgende Institutionen sind neben der Bundesanstalt für Wasserbau in das Consortium als Partner eingebunden:

- Stichting Deltares, Delft, Niederlande
- Ecologic Institute, Berlin, Germany
- Consorzio Ferrara Ricerche, Ferrara, Italien
- University of Algarve, Faro, Portugal
- International Marine and Dredging Consultants, Antwerpen Belgium
- Institute of Oceanology, Varna, Bulgarien
- Littoral ENvironnement et Sociétés UMR 7266, La Rochelle, Frankreich
- Delft University of Technology, Delft, Niederlande
- World Meteorological Organisation, Genf, International
- Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spanien

- CIMA Research Foundation, Savona, Italien
- EurOcean Foundation, Lissabon, Portugal
- Stockholm Environment Institute, Stockholm, Schweden
- Middlesex University, Flood Hazard Research Center, London, Vereinigtes Königreich
- University of Caen, Caen, Frankreich
- University of Cambridge, Cambridge Coastal Research Unit, Cambridge, Vereinigtes Königreich
- UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, International.

### 1.2 Bedeutung für die WSV

Die Wasser- und Schifffahrtsämter sind über das Meldewesen in den Katastrophenschutz bei Hochwasserereignissen eingebunden. Die im Projekt erarbeiteten Werkzeuge können den Ämtern helfen, frühzeitig gezielte Warnungen an betroffene Gemeinden weiter zu leiten.

Ereignisse wie das Sturmhochwasser 1989 (NEEMANN 1994) in der westlichen Ostsee können erhebliche Schäden bei der Sportschifffahrt verursachen. Gesunkene Fahrzeuge können Zufahrten zu Hafenanlagen blockieren, Treibgut kann zu Behinderungen im Schiffsverkehr führen. Eine Minimierung der Risiken durch solche Ereignisse hilft somit auch, die Sicherheit der Wasserstraßen zu verbessern.

Das Projekt kann dabei helfen, den Wissensschatz über die Wirkung von extremen Wasserspiegelauslenkungen in der Ostsee auf Schifffahrtswege und Hafenanlagen zu erweitern.

### 1.3 Untersuchungsziel

Die Bundesanstalt für Wasserbau hat im Rahmen des Projektes die Betreuung der Fallstudienregion Kieler Förde übernommen. Das Arbeitspaket 1 beinhaltet die Bereitstellung von Daten und Software für die Arbeitspakete 4 und 5 für die Fallstudienregion. Im Arbeitspaket 2 werden die gewonnenen Daten zur Entwicklung eines Werkzeugs zur Risikoanalyse aufbereitet. Hierzu wurden aus der Fallstudienregion für ihre Verletzlichkeit gegenüber Hochwasser bekannte Objekte ermittelt und tiefenabhängige Risikokurven aufgestellt. Das Arbeitspaket 3 beschäftigt sich mit der Entwicklung eines modellgestützten Frühwarnsystems für Überflutungsereignisse. In Arbeitspaket 4 werden auf Grundlage der in Arbeitspaket 1 erarbeiteten Bestandsaufnahme Strategien entwickelt, mit bestimmten Gefährdungsmustern umzugehen. Arbeitspaket 5 beschäftigt sich mit dem Test des in Arbeitspaket 3 entwickelten Frühwarnsystems und der Überführung in einen operationellen Betrieb in der Fallstudienregion.

## 2 Untersuchungsmethoden

Für das Arbeitspaket 1 werden die physikalischen Daten aus den verfügbaren Quellen wie Datenbanken, Literatur und geographischen Informationssystemen zusammengetragen und für die Weiternutzung im Projekt sinnvoll aufbereitet. Es werden Interviews mit Personen aus verschiedenen Kreisen der Bevölkerung geführt.

Für die Risikobewertung werden Risikokurven für die Nutzung typischer Marinas an der Kieler Förde sowie der Strände und Campingplätze erarbeitet.

Für die Nutzung des von Deltares für den Küstenbereich zu erweiternde Frühwarnsystems FEWS (WERNER et al. 2013) wird ein hydronumerisches Modell auf der Basis des Verfahrens DELFT3D (STICHTING DELTARES 2014a, 2014b) aufgebaut. Das System FEWS wird hierzu auf einem PC der BAW installiert werden, auf dem bereits das Verfahren DELFT3D installiert ist. Mehrere historische Ereignisse werden zum Testen und Anpassen des Systems gerechnet. Dazu werden die Eingangsdaten geeignet aufbereitet, so dass der operationelle Betrieb des Systems nachempfunden werden kann.

### 3 Ergebnisse

Im Berichtsjahr wurden die folgenden Ergebnisse erzielt: Das Arbeitspaket 1 wurde abgeschlossen und ein Review der Gefährdung der Küstenregion in der Fallstudienregion anhand historischer Ereignisse erarbeitet. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein interner Bericht (SEIB 2014) verfasst. Teile des Berichtes sind in englischer Sprache in den Zwischenbericht des Abschnitts 1.2 eingeflossen.

Der Bericht weist die Fallstudienregion als sicher aus, soweit es die existenzielle Vorsorge im Küstenumfeld betrifft. Es wurde jedoch auch auf Defizite, insbesondere in der Wahrnehmung der Risiken bei Sportbootanlagen und anderen touristischen Einrichtungen (Campingplätzen, Strandinfrastruktur), hingewiesen. Auch wurde ein relativ gering ausgeprägte Sensibilisierung für die generellen Risiken von Sturmhochwassern bei den interviewten Personen erkannt, was auf die subjektive Wahrnehmung solcher Ereignisse zurück geführt wurde (geringe Häufigkeit der Ereignisse, wenig Bezug zu Bereichen des Lebens, wo diese Ereignisse nach wie vor eine Gefährdung darstellen).

Die Einrichtungen des Katastrophenschutzes decken das Risiko des Verlustes von Sachwerten im Küstenraum nicht ab, sondern konzentrieren sich auf den Personenschutz. Somit bleiben schwere Sturmhochwasser nach wie vor eine Gefährdung der Region hinsichtlich des Wohlstandes.

Mit der Datenbasis wurde eine in Bezug auf Auswirkungen konzipierten Datenbank historischer Ereignisse aufgebaut (RISC-KIT 2015), welche zum Jahresbeginn 2015 online im Internet sichtbar geworden ist (Bild 1). Die Datenbank hilft potentiellen Endnutzern des Projektes, sich über historische Hochwasserkatastrophen in den Fallstudienregionen zu informieren. Für die Kieler Region konnte insbesondere für das Hochwasserereignis vom 27./28. August 1989 umfangreiches Material kompakt dargestellt werden.

Als Nebenprodukt der Arbeiten ist eine Literatur- und Fotosammlung entstanden. Es wurden Interviews mit Anwohnern der Fallstudienregion geführt. Für Arbeitspaket 3 wurde ein hydrologisches Modell zur Ermittlung von Wasserständen und Wellenparametern für die Fallstudienregion aufgebaut und in das Frühwarnsystem eingebunden. Das hydronumerische Modell basiert auf dem Verfahren DELFT3D. Das Modell wurde in das Frühwarnsystem von RISC-KIT, welches auf der Software FEWS aufbaut, im Rahmen einer Schulung integriert.

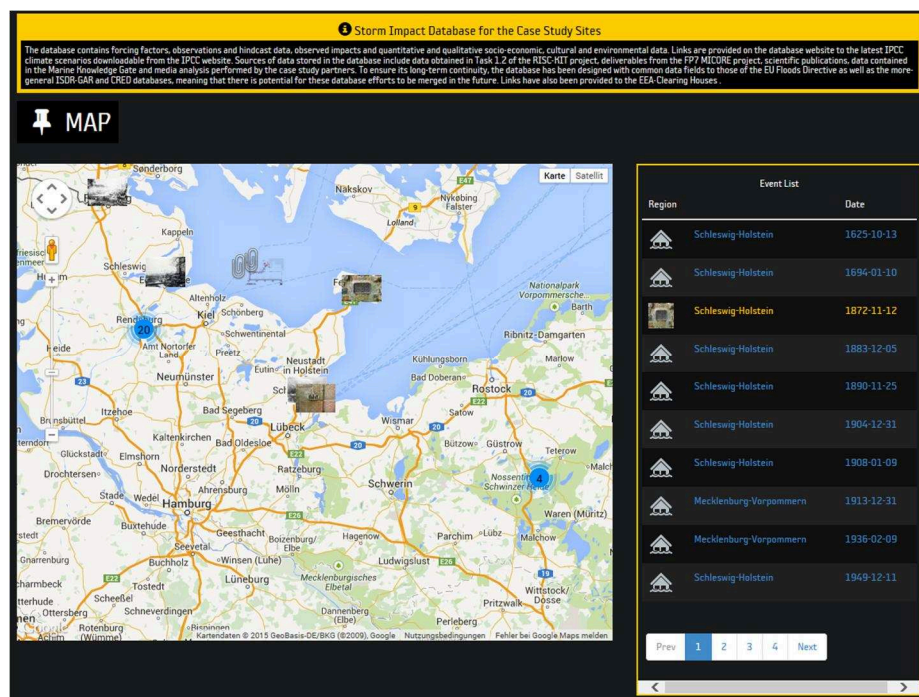


Bild1: Öffentlich zugänglicher Bereich der Datenbank historischer Hochwasserereignisse im Netz.

Es fanden zwei „RISC-KIT Status Meetings“ in Cambridge (Mai) und Bologna (November) statt. Hier wurden die erreichten Projektziele vorgestellt und die folgenden Projektabschnitte organisatorisch besprochen. Zum 2. Meeting wurden ausgewählte Endnutzer aus den Fallstudienregionen eingeladen. Auf das Projekt wurde bei ausgewählten Endnutzern aufmerksam gemacht.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2015: Für das Arbeitspaket 3 wird noch ein auf dem Verfahren XBEACH basierendes Strandmodell in das FEWS integriert werden. Das Arbeitspaket 4 wird begleitend unterstützt werden. Mit den Tests des CRAF-Tools und Frühwarnsystems wird begonnen. Dazu werden u. a. vier Hochwasserereignisse und davon abgeleitete Klimaszenarien für die Simulation aufbereitet.

Die Status-Meetings 2015 werden in Berlin und Brüssel stattfinden.

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2017.

#### **5 Literatur**

- Neemann, V. (1994): Beschreibung des Sommerhochwassers an der westlichen Ostseeküste von Schleswig-Holstein am 28.08.1989 mit Vergleich anderer Hochwasser. In: Gewässerkundliches Jahrbuch 1989. 2-14, 1994.
- RISC-KIT (2015): Storm Impact Database for the Case Study Sites. RiscKit tool. RISC-KIT Consortium, <http://risckit.cloudapp.net/risckit/#/map>, last visited: 21.01.2015.
- Seiß, G. (2014): Bewertung des Gefahrenpotentials von Sturmhochwassern in der Region Kieler Förde. Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg, 27 p., 2014.
- Stichting Deltares (ed.) (2014a): Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. Delft, 2014a.
- Stichting Deltares (ed.) (2014b): Delft3D-WAVE. Simulation of short-crested waves with SWAN. 2014b.
- Werner, M.; Schellekens, J.; Gijssbers, P.; van Dijk, M.; van den Akker, O. and Heynert, K. (2013): The Delft-FEWS flow forecasting system. In: Environmental Modelling & Software, Vol. 40, 65-77, doi: 10.1016/j.envsoft.2012.07.010, 2013.

#### **6 Veröffentlichungen**

-/-

## **Schaffung von tidebeeinflussten Marschen an der Tideelbe zur Verbesserung des physikalisch biologischen Systems**

**Netzplan-Nr.:** A39550370214

**Projektleiter:** Dr. N. Winkel, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Ästuarsysteme II (K3)

**E-Mail:** norbert.winkel@baw.de

**Bearbeiterin:** Dr.-Ing. A. Büscher, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Ästuarsysteme II (K3)

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

In diesem Projekt wird der Einfluss von neugeschaffenen tidebeeinflussten Marschen auf die hydrodynamischen Bedingungen in der Tideelbe sowie auf den Sedimenthaushalt untersucht. Dafür wird eine Landfläche, die gegenwärtig noch eingedeicht ist und deutlich unter NHN liegt, als Sedimentationsfläche genutzt. Diese könnten einen entscheidenden Beitrag leisten, die Auswirkungen bisheriger Ausbaumaßnahmen und eines möglichen zukünftigen Klimawandels ausgleichen zu können.

Im Projekt soll mithilfe eines geeigneten Bearbeitungskonzeptes geprüft werden, ob die Fläche so angeschlossen werden kann, dass die Tidedynamik und der Sedimenthaushalt positiv beeinflusst werden können. Zusätzliche Fragen ergeben sich im Zusammenhang mit der Wechselwirkung Physik – Biologie (z. B. Einfluss der Vegetation auf die Sedimentation), der Entwicklung der Brackwasser- und Trübungszone sowie der Schadstoffbelastung. Außerdem wird untersucht, ob diese Fläche auch als Vorfluter dienen könnte, um den NOK und den Binnenfluss Stör bei Extremereignissen bezogen auf die Entwässerung zu entlasten. Eine weitere wichtige Fragestellung besteht darin, ob und in welchem Maße die angeschlossene Fläche zu einer verbesserten Wechselwirkung zwischen dem Oberflächengewässer und dem Grundwasser führen kann (Beurteilung durch K1).

Für die Tideelbe ist bislang noch keine derartige Maßnahme untersucht worden. Den aktuellen Stand der Forschung geben die Untersuchungen wieder, die im Rahmen der Untersuchungen des Tideelbe-konzeptes (BAW 2012, HPA 2013) durchgeführt werden. Hier werden jedoch speziell Retentionsräume und Sedimentationsflächen im Bereich der Trübungszone untersucht.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Zunahme der Feinmaterialmengen, die Schadstoffbelastung der Sedimente und die sommerlichen Sauerstoffdefizite prägen die bestehenden ökologischen Defizite in der Tideelbe. Die Zunahme der zu baggernden Feinmaterialmengen ist zum einen durch verstärkten Eintrag und Stromauftransport von marinem Feinmaterial sowie eine verstärkte Mobilität von Sedimenten (höhere Strömungsgeschwindigkeiten) und zum anderen durch eine Zunahme von Baggerkreisläufen bedingt. Für die WSV könnte die Schaffung von tidebeeinflussten Marschen eine Reduzierung der Unterhaltungsaufwendungen und eine Verbesserung des ökologischen Zustands der Tideelbe bedeuten.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel ist der Aufbau eines Bearbeitungskonzeptes sowie die Ermittlung des Potenzials und der Realisierbarkeit derartiger Maßnahmen an der Tideelbe (Vorlaufforschung).

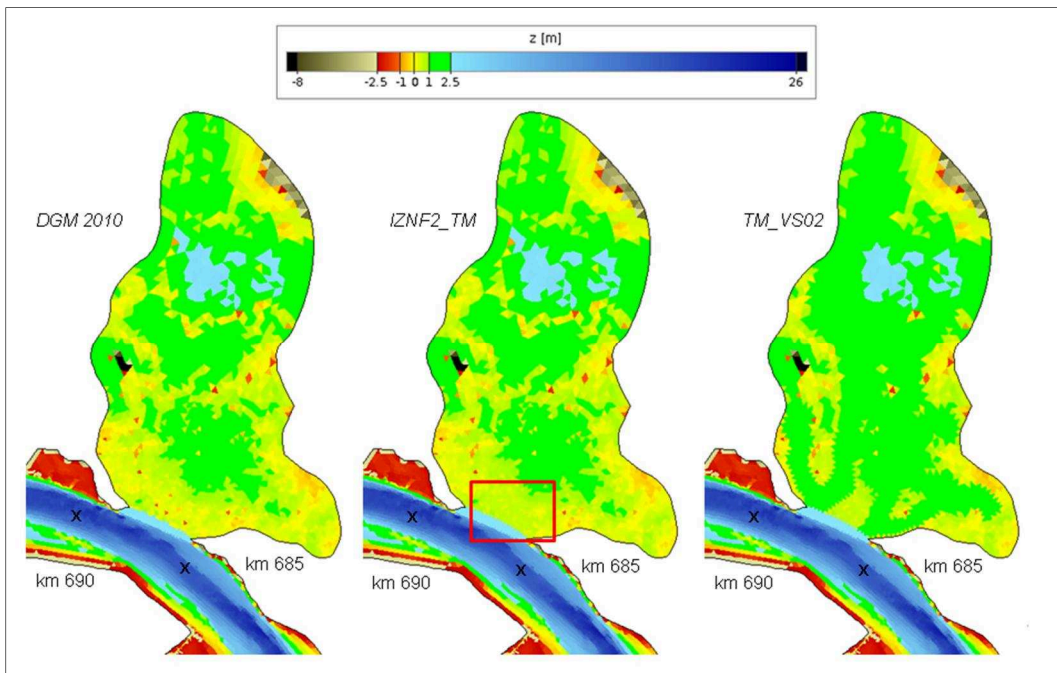
### **2 Untersuchungsmethoden**

In Absprache mit der Universität Hamburg (Fremdleistungsempfänger) ist ein Konzept entwickelt worden zur Abschätzung des langfristigen Sedimentationsgeschehens und der Vegetationsentwicklung auf der Marsch über 100 Jahre unter Berücksichtigung eines Meeresspiegelanstiegs. Grundlage bildet die Anwendung des HN-Modells der Tideelbe durch die BAW und eines multiplen Regressionsmodells durch die Universität Hamburg. Es werden 4 Zeitscheiben à 25 Jahre sowie der Ist-Zustand 2010 mit angeschlossenem Flutraum betrachtet. Es wird pro Zeitscheibe näherungsweise ein Mee-

resspiegelanstieg von 25 cm angenommen (entspr. 100 cm in 100 Jahren). Des Weiteren wird mithilfe von HN-Simulationen und Tidekennwertanalysen der Einfluss des angeschlossenen Flutraums auf die Tidedynamik und den Salz- und Schwebstofftransport in der Tideelbe untersucht. Weitere Details s. Kapitel 3.

### 3 Ergebnisse

Im Berichtsjahr sind das numerische Gitter des Flutraumes (BAW-Modell) mit dem digitalen Geländemodell 2010 belegt (Bild 1, links) und Testrechnungen durchgeführt worden. Es zeigt sich, dass die Topographie im Anschlussbereich des Flutraumes angepasst werden muss, um den Ein- und Austritt der Tide zu verbessern. Hierfür werden Erhöhungen im Einlaufbereich manuell abgesenkt (Entnahme von ca. 0,8 Mio m<sup>3</sup> Material, Bild 1, Mitte, roter Kasten, Variante IZNF2\_TM). Die Analyse der Testrechnungen ergibt, dass der Sedimenteintrag in den nördlichen Bereich des Flutraumes gering ist. Zur Förderung der Tidedynamik ist daher in einem weiteren Schritt anhand des Strömungsbildes ein Rinnensystem (Tiefe -1,5 m NHN) in die Topographie des Flutraumes eingefügt worden (Bild 1, rechts, Variante TM\_VS02). Diese Variante ermöglicht zusätzlich die geeignete Anwendung des multiplen Regressionsmodells zur Sedimentation durch die Universität Hamburg (Fremdleistungsnehmer).

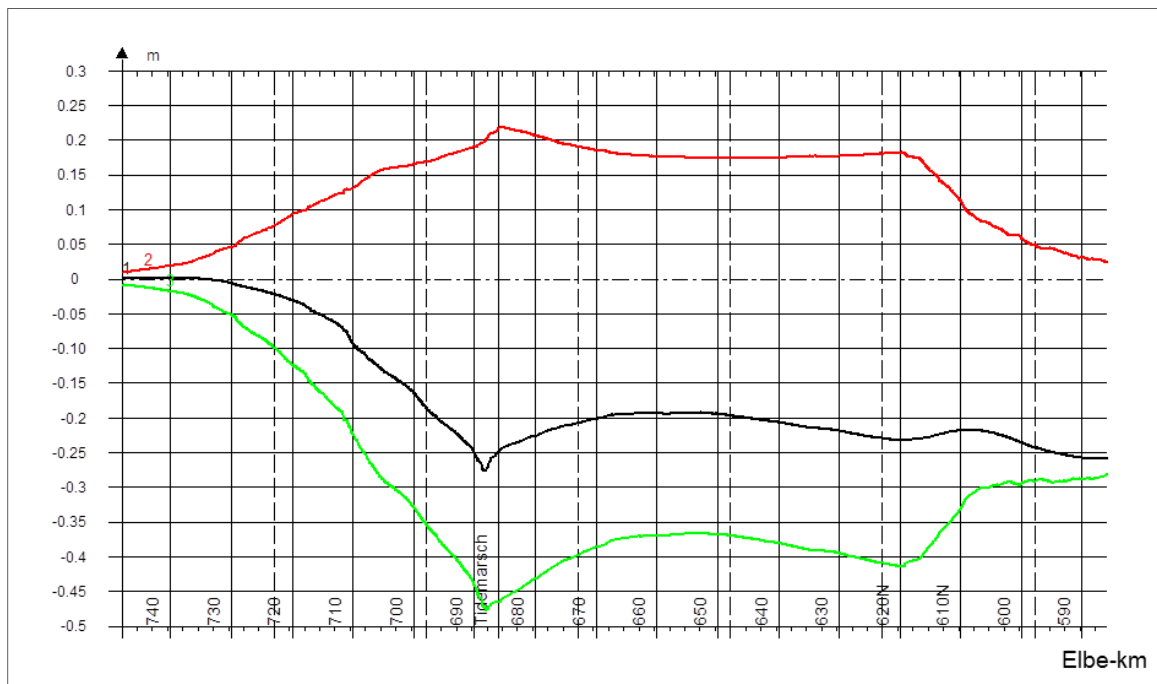


**Bild1:** Manuelle Anpassungen der Marschtopographie im numerischen Elbmodell, li.: DGM 2010 unverä., Mitte: abgesenkte Inseln im Anschlussbereich/roter Kasten – Variante IZNF2\_TM, re.: eingefügtes Rinnensystem – Variante TM\_VS02

Des Weiteren werden Testrechnungen zur Plausibilität der Sedimentationsprozesse im Flutraum durchgeführt. In einem ersten Schritt wird der Flutraum mit nicht-erodierbaren Sedimenten belegt. Dies ermöglicht die Abschätzung des Sedimenteintrages in die Tidemarsch aus dem Hauptstrom der Tideelbe und somit deren Funktionalität. Die Simulationen zeigen, dass der Flutraum die Funktion einer Sedimentationsfläche erfüllt. Außerdem beeinflusst der Anschluss der Fläche die Tidewasserstände entlang der Tideelbe positiv. Die Analyse der Tidekennwerte für einen Spring-Nipp-Zyklus ergibt, dass durch den Anschluss des Flutraums (Variante TM\_VS02, Tidevolumen ca. 113 Mio m<sup>3</sup>) im Vergleich zum Ist-Zustand das mTnw stromauf der Maßnahme um ca. 17 cm angehoben wird (s. Bild 2). Das mThw wird stromauf der Maßnahme um ca. 22 cm abgesenkt. Dies ergibt eine Abnahme des mittleren Tidehubs um ca. 40 cm stromauf der Maßnahme. In einer Masterarbeit, die im Berichtsjahr an der BAW-DH betreut worden ist, wird der Einfluss unterschiedlich konzipierter Fluträume auf die Verhältnisse an der Tideelbe untersucht (Geiger, 2014). Für das folgende Berichtsjahr sind weitere

systematische Untersuchungen zum Einfluss der Tidemarsch auf die Tidedynamik und den Salz- und Sedimenttransport geplant.

In weiteren Testrechnungen wird der Flutraum mit erodierbarem Material belegt, einmal im nicht-morphodynamischen (Variante TM\_VS02) und im morphodynamischen Modus (Variante TM\_VS03), um lokale Erosions- und Umlagerungsprozesse in der Marsch realitätsnäher abzubilden. Im nicht-morphodynamischen Modus ergeben sich lokal starke Erosionsbereiche bis zu mehreren Metern, da kein Material zur Umlagerung und Verfüllung zur Verfügung steht. Diese treten bei den morphodynamischen Simulationen nicht auf, da lokale Umlagerungen in der Simulation berücksichtigt werden und die Topographie in jedem Zeitschritt aktualisiert wird. Die morphodynamischen Rechnungen werden daher als plausibler eingestuft.

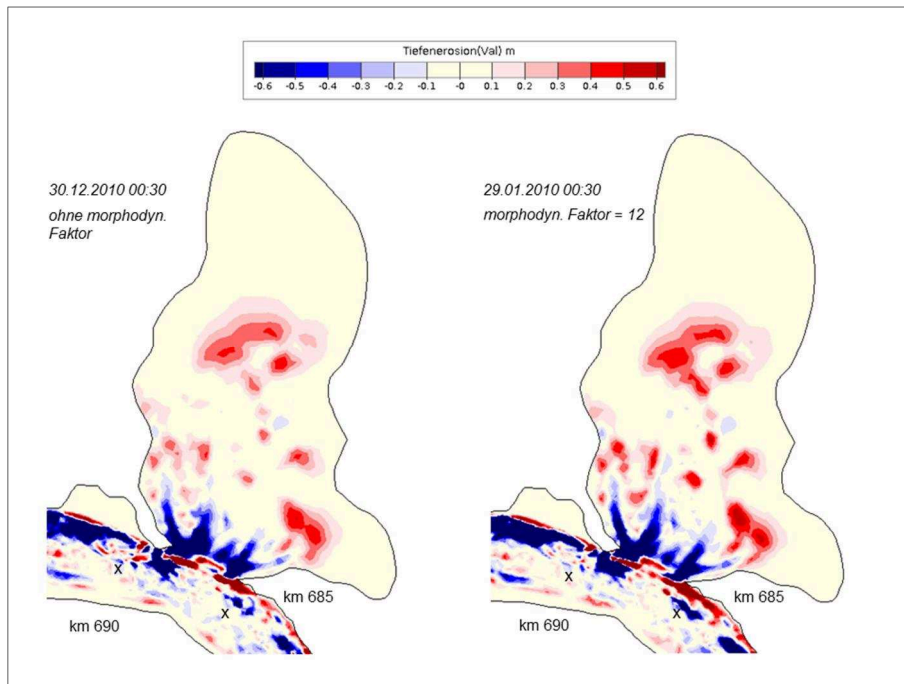


**Bild 2:** *Differenzen des mittleren Tidehochwassers (mThw, in Schwarz), des mittleren Tideniedrigwassers (mTnw, in Rot) und des mittleren Tidehubs (mThb, in Grün) der HN-Simulation mit angeschlossenen Flutraum (TM\_VS02) und Ist-Zustand ohne Flutraum*

Im Berichtsjahr hat des Weiteren die Erstellung des Bearbeitungskonzeptes, die Berechnung der ersten Zeitscheibe (Ist-Zustand, Jahr 2010) und die Absprachen zur Datenübergabe mit der Uni HH wie folgt im Vordergrund gestanden:

Die BAW führt Modellrechnungen mit dem aktuellen Elbmodell und angeschlossenen Flutraum im morphodynamischen Modus durch (Variante Rinnensystem, TM\_VS03) durch (1.1.2010 – 30.12.2010, Topographie 2010), MSL-Anstieg +0cm. Die Simulationsergebnisse für Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeiten, Salz- und Sedimenttransport werden gemäß dem Datenbedarf der UniHH analysiert (HW, NW, DUB, max. und mittl. Schwebstoffgehalt, max. und mittl. Salzgehalt, s. BAWiki) und diese zusammen mit der zugehörigen Topographie der Uni Hamburg übergeben. Die Analysezeiträume umfassen Zeitscheiben von ca. je 14 Tagen. Mit den Analysedaten ermittelt die Uni HH Sedimentationsraten [m/Jahr] für die Wasserwechselzone im Flutraum mithilfe ihres multiplen Regressionsmodells und skaliert die Raten vom m/Jahr auf m/25 Jahre. Die BAW skaliert die Sedimentationsraten aus den numerischen Modellrechnungen für den Bereich außerhalb der Wasserwechselzone im Flutraum von m/Jahr auf m/25 Jahre. Da allerdings mit dem aktuellen Elbmodell aufgrund von Speicherkapazitäten und zu großer Simulationslaufzeiten keine Zeiträume > 1 Jahr simuliert werden können, werden Testrechnungen mit einem morphodynamischen Faktor durchgeführt. Dieser soll die Simulation langer Zeiträume (25 Jahre) bei relativ kurzer Simulationslaufzeit ermöglichen. Die Testrechnungen über

1 Monat mit einem Faktor 12 (entspr. einem Simulationszeitraum von 12 Monaten) liefern zufriedenstellende Ergebnisse, s. Bild 3. Auf Grundlage der Sedimentationsraten für 25 Jahre der Uni HH und der BAW wird anschließend die Topographie 2035 der Tidemarsch erstellt. Für die weiteren Zeitscheiben soll ähnlich verfahren werden.



**Bild 3:** Vergleich der Tiefenerosion zwischen dem Lauf ohne morphodynamischem Faktor (links) und mit morphodynamischem Faktor = 12 (rechts) (negative Tiefenerosion entspricht Erosion, positive Tiefenerosion entspricht Sedimentation)

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

In der Zeit vom 1. Januar bis 30. April 2015 Jahr sollen folgende Arbeiten durchgeführt werden:

- 2015:
1. Anwendung des Arbeitskonzeptes für die Zeitscheiben 2035 – 2110.
  2. Untersuchungen zum Einfluss des Flutraums auf die Tidedynamik und den Salz- und Sedimenttransport bei konstantem Oberwasserzufluss in der Tideelbe.
  3. Einschätzung des Sedimentationsverhaltens des Modells in Vegetationsgebieten.
  4. Auf der Grundlage von Modellergebnissen soll eine erste Einschätzung über den Einfluss der tidebeeinflussten Marsch auf die Grundwasserverhältnisse abgegeben werden (K1).
  5. Es wird phänomenologisch erarbeitet, ob die Fläche als Vorfluter genutzt werden kann.

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2015.

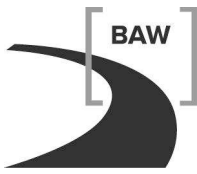
#### 5 Literatur

BAW (2012): Untersuchung des Strombaus und des Sedimentmanagements im Rahmen des "Tideelbekonzeptes". Bericht zur Wirkung der Maßnahmen im Bereich Spadenland. BAW-Nr. A3955 03 10172-4, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. Unveröffentlicht.

BfG (2013): Sedimentmanagement Tideelbe - Strategien und Potenziale - Systemstudie II. Ökologische Auswirkungen der Unterbringung von Feinmaterial. Band 1, Endbericht. Im Auftrag des Wasser- und Schifffahrtsamtes Hamburg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, BfG-1763.

HPA (2013): Towards Integrated Estuarine Management. Tidal River Development. Manfred Meine, Hamburg Port Authority, Neuer Wandrahm 4, 20457 Hamburg. März 2013





## 6 Veröffentlichungen

Geiger, C. (2014): Simulation und Analyse einer tidebeeinflussten Sedimentationszone im Deichhinterland und ihre Wirkung auf die Trübungszone im Elbästuar - Sensitivitätsstudie unter heutigen und möglichen zukünftigen Bedingungen. Masterarbeit, Studiengang Bauingenieurwesen, Technische Universität Hamburg-Harburg.

**RichWPS - Effizientere Nutzung von Geodaten mit Web Processing Service**

Netzplan-Nr.: A39550670201

Projektleiter: Dr.-Ing. Rainer Lehfeldt, Dienststelle Hamburg, Geschäftsstelle KFKI

E-Mail: rainer.lehfeldt@baw.de

**1 Problemdarstellung und Ziel**

Web Processing Services (WPS) stellen ein wesentliches Konzept web-basierter Geodaten-Infrastrukturen dar. In dem vom BMBF geförderten Projekt RichWPS (01IS12041C) werden sie für Pilotanwendungen der BAW anhand von datenaufwändigen Simulationskomponenten praxistauglich konkretisiert und erweitert. Die Ergebnisse werden in die deutsche Marine Dateninfrastruktur MDI-DE integriert und gewinnen im Rahmen der Erfüllung von EU-Richtlinien immer mehr an Bedeutung.

**1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Geodaten bzw. Daten mit Orts- und Raumbezug sind für vielerlei Zwecke (öffentliche Verwaltung, Wissenschaft, Geomarketing, Verkehrsplanung, -steuerung und -logistik, Energieerzeugung und -versorgung, Tourismus u.v.m.) wichtig und bieten Ansatzpunkte zur Erzeugung von Mehrwerten, auch und gerade aus Daten der öffentlichen Verwaltung [Fornefeld, M. et al., 2010]. Die wachsende Nutzung mobiler Endgeräte mit GPS und Internetzugang für die mobile Datenerzeugung und die ortsbezogene Datennutzung, die Veröffentlichungspflichten, die Open Data Initiativen in der öffentlichen Verwaltung und die EU Richtlinien wie INSPIRE erfordern innovatives Management von (Geo-)Daten.

Die Voraussetzung für eine breite Nutzung von Geodaten und für interoperable Geodateninfrastrukturen (GDIn) ist die Verwendung offener Standards für Daten- und Metadatenmodelle, für Kommunikationsarchitekturen und -protokolle [Tsou, M.-H. und Buttenfield, B. P., 2002]. Die Standards des Open Geospatial Consortium (OGC), zusammen mit den Normen der ISO, schaffen die Voraussetzung für moderne und zukunftssichere Geodateninfrastrukturen. Mit der europäischen Geodateninitiative INSPIRE werden sie zudem Grundlage für den überregionalen und internationalen Austausch von Geodaten in der öffentlichen Verwaltung.

Mittlerweile sind die OGC-Standards zur Informationsbereitstellung im Web (Web Feature Service WFS für Geodatenzugriff und Web Map Service WMS für den Landkartenzugriff) stabil und in der praktischen Nutzung weit verbreitet. Der Web Processing Service WPS [Schut, P., 2007] zum Anbieten und Nutzen komplexer räumlicher Verarbeitungen und Analysen im Internet ist dagegen noch wenig verbreitet [Schäffer, B., 2008; Foerster, T. et al., 2010].

Der WPS Standard beschreibt, wie räumliche Verarbeitungsprozesse über eine Web-Schnittstelle angesprochen werden können. Solche Verarbeitungsprozesse umfassen jegliche Algorithmen, Berechnungen oder Modelle, die räumlich referenzierte Vektor- oder Rasterdaten verarbeiten. Ein WPS kann einfache Berechnungen anbieten, wie die Subtraktion einer räumlich referenzierten Zahl von einer anderen (z. B. die Ermittlung der Differenz der Anzahl der Grippeerkrankungen zwischen zwei Jahren an einem bestimmten Ort) oder komplexe Vorgänge wie ein globales Modell der Klimaveränderung. Bei umfangreichen Vorgängen können mehrere Prozesse mit Hilfe der interoperablen Struktur der OGC Dienste verknüpft werden [Peltz, C., 2003].

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Die BAW sammelt Erfahrungen und Kenntnisse, die später helfen sollen, die eigenen Geodateninfrastrukturen effizienter und effektiver zu gestalten, sowie Planungen für zukunftsfähige Weiterentwicklungen zu erstellen. Pilotimplementierungen der neuen Werkzeuge für Geodatenverarbeitungsprozesse werden in die deutsche Meeresdateninfrastruktur MDI-DE integriert. Die BAW spielt eine wichtige Rolle bei der Ergebnisverbreitung und Projektvernetzung für wasserwirtschaftliche Planungen und Analysen.

Die Vorteile von WPS bei der Geodatenverarbeitung entsprechen denen, die man sich allgemein von der Dienstorientierung im Internet verspricht:

- Reduzierung der Komplexität bei der Datenverarbeitung durch Bereitstellung von plug&play-Algorithmen;
- Verkettung von Verarbeitungsschritten zu komplexen Prozessen;
- einmalige Bereitstellung von Verarbeitungsfunktionalität, die überall einfach genutzt werden kann;
- vereinfachte Wartung, weil Prozesse und Modelle zentral von denjenigen gewartet werden, die sie erzeugt haben;
- bessere Möglichkeiten zur Nutzung verteilter Rechenleistung.

### 1.3 Untersuchungsziel

Ziel des Projekts RichWPS ist es, die Standards des Open Geospatial Consortium für WPS praxistauglicher zu konkretisieren, zu erweitern und softwaretechnisch besser zu unterstützen. Dazu werden eine benutzerfreundliche Modellierungsumgebung entworfen und prototypisch umgesetzt; innovative WPS-Server und -Clients realisiert; Best-Practice Implementierungen anhand konkreter Geodaten-Verarbeitungsprozesse aus der öffentlichen Verwaltung geschaffen und daran die technischen Projektansätze validiert. Da die WPS-Konzepte ihrer praktischen Umsetzung und Verbreitung weit voraus sind, ist es das Ziel des Vorhabens, die zeitgemäße Weiterentwicklung und breitere Nutzung von WPS zu unterstützen.

## 2 Untersuchungsmethoden

Im Forschungsverbund wird eine Architektur entworfen und exemplarisch implementiert, die die wesentlichen Systembausteine eines RichWPS-Dienste-Systems identifiziert und initiale Beschreibungen der Schnittstellen zwischen den Komponenten realisiert. Die BAW untersucht die Anforderungen für WPS-Nutzungsszenarien und -werkzeuge, setzt Beispielprozesse prototypisch um, und validiert und bewertet aus Benutzersicht die technischen Konzepte und Prototypen. Dabei vertritt die BAW die Perspektive einer großen und verteilten, stark vernetzten Bundesoberbehörde. Technisch werden insbesondere Prozesse mit rechen- und datenaufwändigen numerischen Simulationskomponenten betrachtet. Dazu werden Realdaten für Test- und Untersuchungszwecke als OGC-Dienste aufbereitet und mit den Methoden des MDI-DE Portals bereitgestellt. Das notwendige Metadatenkonzept für Modelldaten wird weiterentwickelt und Testbedingungen definiert. Die Projektergebnisse werden prototypisch in die MDI-DE integriert.

Die disy Informationssysteme GmbH arbeitet als Konsortialführer und etabliertes Softwareunternehmen in der Verarbeitung von Geodaten mit der Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik der Hochschule Osnabrück (HS-OS) zusammen, welche die anwendungsorientierte Forschung zum Software-Engineering beisteuert. Zwei Pilotanwender aus der öffentlichen Verwaltung, die BAW und der schleswig-holsteinische Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz (LKN) stellen sicher, dass die Technik- und Methodenentwicklungen von disy und HS-OS an den Bedürfnissen und Möglichkeiten von Praktikern orientiert sind.

## 3 Ergebnisse

Das Vorhaben wurde im Zeitraum 01.01.2013 bis 31.12.2014 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms KMU-innovativ gefördert. Es wurde zusammen bearbeitet von

- disy Informationssysteme GmbH, Karlsruhe,
- Hochschule Osnabrück, Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik, Osnabrück,
- Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg,
- Landesbetrieb Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein, Tönning.

Die BAW war insgesamt 21 Monate beteiligt.

Das Arbeitsprogramm des Forschungsverbundes gliederte sich in 6 Arbeitspakete:

- AP1 Anforderungen und Spezifikationen
- AP2 RichWPS Model-Builder
- AP3 Rich-WPS Client- und Serverkomponenten
- AP4 Pilotanwendungen & Konzeptvalidierung
- AP5 Ergebnisverbreitung und Projektvernetzung

AP6 Projektmanagement und Qualitätssicherung

Die BAW war maßgeblich an AP1, AP4, AP5 und AP6 beteiligt.

Der Projektfortschritt wurde durch konkrete Meilensteine markiert und durch die halbjährlichen Zwischenberichte an den Projektträger Softwaresysteme und Wissenstechnologien (PT-SW) im DLR dokumentiert.

In Bild 1 wird der innovative Ansatz von RichWPS dargestellt. Dabei wird von einem Fachexperten mit Hilfe der neu entwickelten Steuersprache ROLA (RichWPS Orchestration Language) ein Verarbeitungsprozess beschrieben, der auf verteilte Dienste unterschiedlicher Anbieter (OWS (OGC Web Service), insbesondere WPS und WFS) zugreifen und diese auf einem RichWPS Server zusammen mit weiteren Verarbeitungsmodulen in einer Orchestration Engine zu einem neuen WPS aufbereiten kann. Dieser so fixierte Workflow kann anschließend von Nutzern in eigenen Klienten als WPS abgerufen werden.

Herzstück dieser Software-Architektur ist der in Bild 2 vorgestellte ModelBuilder, Dieser bietet im linken Menübereich die verfügbaren Dienste und Prozesse an, die über den SemanticProxy als Vermittler zu den verteilten Quellsystemen verwendet werden können. Die rechte Menüleiste enthält Details zu den Modellierungskomponenten und im unteren Bereich können Informationen zu Installation, zum Testen und zum Gesamtsystem angezeigt werden. Im zentralen Modellierungsfeld wird der beabsichtigte Workflow mit Hilfe graphischer Elemente modelliert und hierbei im Hintergrund mit der ROLA in einem Ausführungsskript dokumentiert.

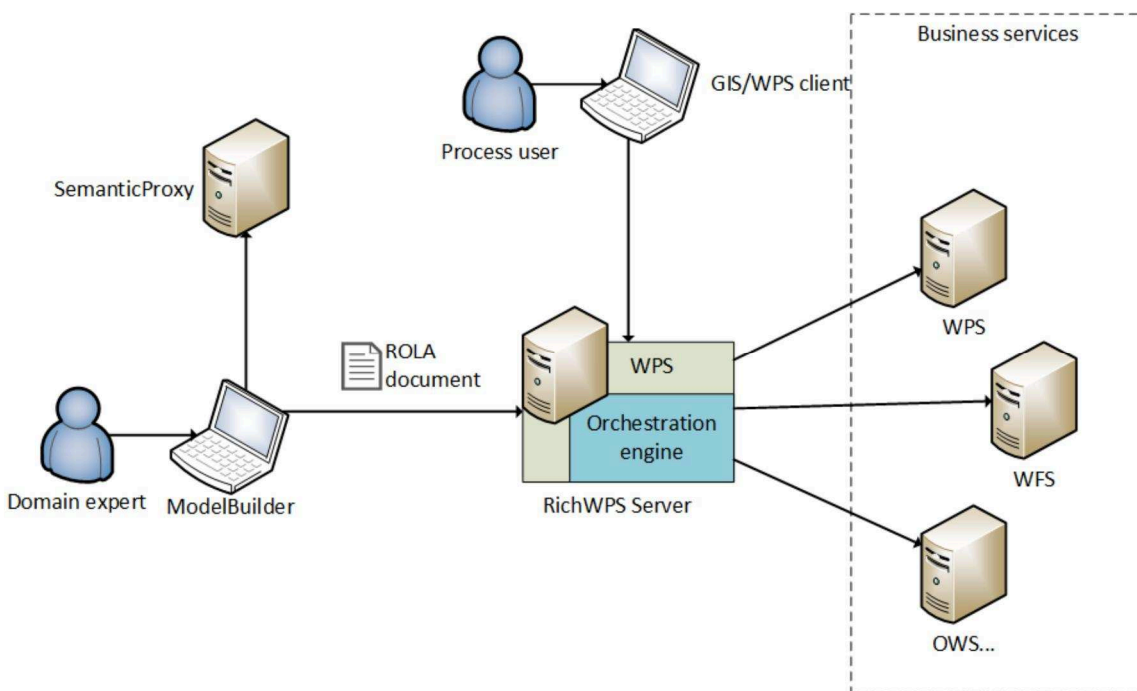


Bild 1: Zusammenspiel von RichWPS Komponenten (Bensmann, F. et al. 2014)

Bild 3 zeigt den Klienten für eine der Prototypanwendungen bei der BAW. Bei dem hier abgebildete Verarbeitungsprozess können Wasserstandswerte von Pegelstationen, die über das integrierte Beobachtungs- und Modellierungssystem COSYNA im Helmholtz-Zentrum Geesthacht verfügbar sind, mit Ergebnissen aus numerischen Simulationen der BAW für die Deutsche Bucht verglichen werden. Derzeit werden die Wasserstands-Ganglinien an den ausgewählten Positionen für einen auszuwählenden Zeitraum angezeigt sowie ein Plot ihrer Differenzen und ihre Fourier-Spektren angeboten.

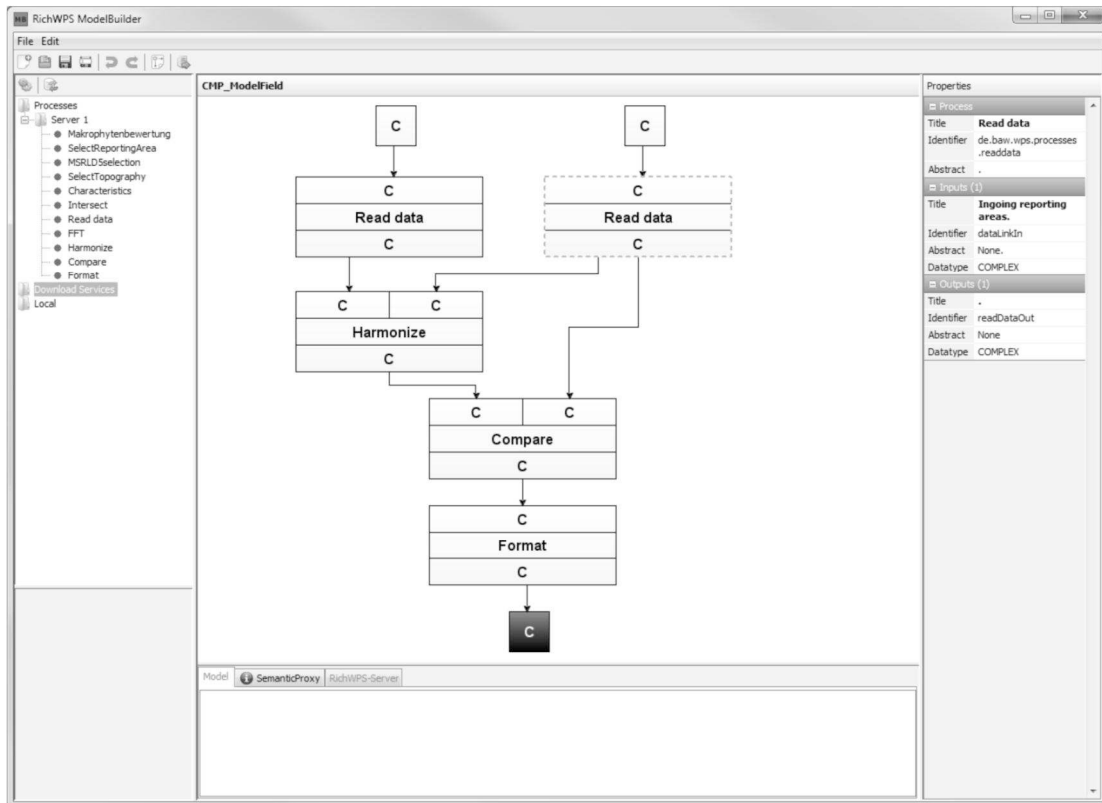
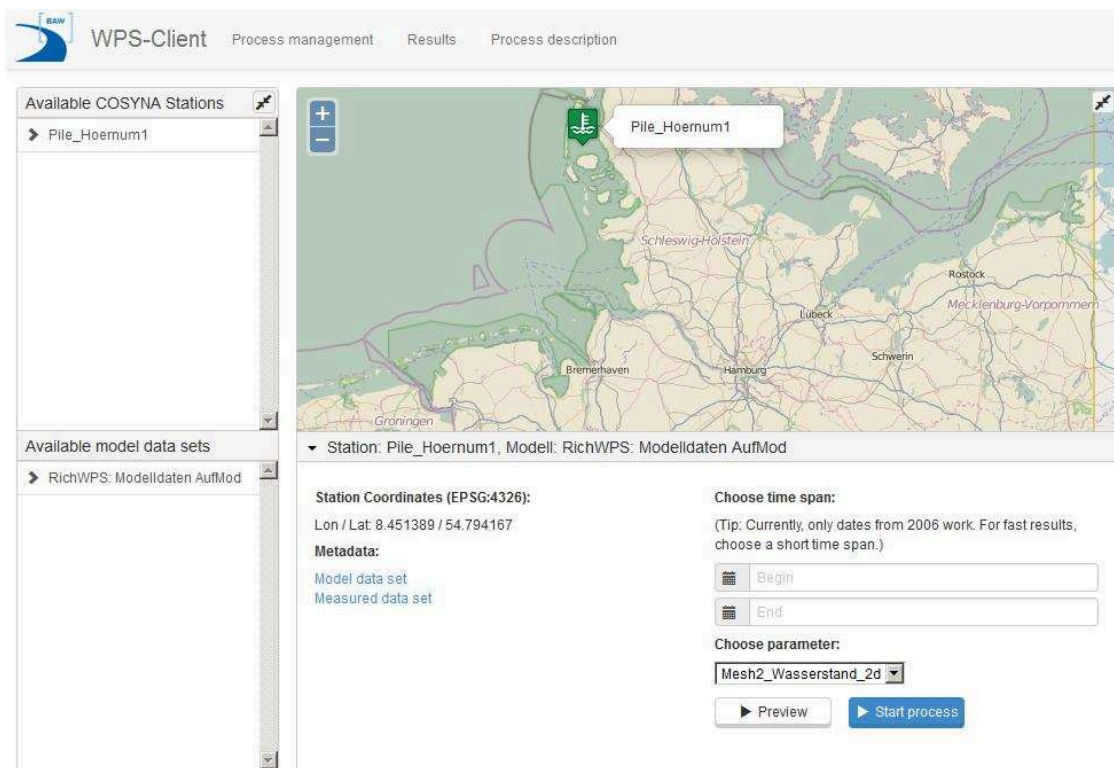


Bild 2: Screenshot des ModelBuilders (Wosniok, C. et al., 2014)



The screenshot shows the WPS-Client interface. The top navigation bar includes 'WPS-Client', 'Process management', 'Results', and 'Process description'. The main area is divided into a map and a configuration panel. The map shows a geographical area with a station marker 'Pile\_Hoernum1'. The configuration panel on the right is titled 'Station: Pile\_Hoernum1, Modell: RichWPS: Modelldaten AufMod'. It contains the following information:

- Station Coordinates (EPSG:4326):** Lon / Lat: 8.451389 / 54.794167
- Metadata:**
  - Model data set
  - Measured data set
- Choose time span:** (Tip: Currently, only dates from 2006 work. For fast results, choose a short time span.)
  - Begin:
  - End:
- Choose parameter:**
  - Mesh2\_Wasserstand\_2d
- Buttons: Preview, Start process

Bild 3: Interaktive Benutzeroberfläche für das Szenario Datenvergleich Feldmessung (COSYNA) und Modellrechnung (BAW)

Aus der Sicht von RichWPS-Nutzern für Dokumentationen im Rahmen von Berichtspflichten fehlt zu der mit ROLA dokumentierten Prozessierung von Geodaten noch die automatisierte Generierung von Metadaten, die zu dem resultierenden WPS als semantische Dokumentation gehören. Derzeit müssen diese Informationen noch per Hand erzeugt werden.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das Vorhaben wird 2015 abgeschlossen.

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2015.

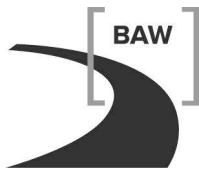
#### 5 Literatur

- Bensmann, F.; Wössner, R.; Abecker, A.; Roosmann, R. and Heidmann, C. (2014): RichWPS Orchestration Environment for Geo Services. In Lehfeldt, R. and Kopmann, R. (Eds): Proceedings ICHE 2014, Hamburg, 1077-1084. <http://vzb.baw.de/e-medien/iche-2014/ICHE2014.html>, 2014.
- Foerster, T.; Schäffer, B.; Baranski, B. und Brauner, J. (2010): Geospatial Web Services for Distributed Processing. In Zhao, P. und Di, L. (Hrsg.): Geospatial Web Services. 245-286. doi: 10.4018/978-1-60960-192-8.ch011, 2010.
- Fornfeld, M.; Beckmann, G. und Fischer, F. (2010): Die europäische Gesetzgebung als Motor für das deutsche GeoBusiness. Studie im Auftrag des BMBF, MICUS Consult, 2010.
- Peltz, C. (2003): Web services orchestration and choreography. Computer, Jg. 36, 10, 46-52. doi: 10.1109/MC.2003.1236471, 2003.
- Schäffer, B (2008): Towards a Transactional Web Processing Service (WPS- T). In Bishr, M., Pebesma, E. und Bartoschek, T. (Hrsg.): Proceedings of the 6th Geographic Information Days. Münster, 2008.
- Schut, P. (Hrsg.) (2007): OpenGIS Web Processing Service. Open Geospatial Consortium (OGC 05-007r7), 2007.
- Tsou, M.-H. and Buttenfield, B. P. (2002): A Dynamic Architecture for Distributing Geographic Information Services. Transactions in GIS, Jg. 6, 4, 355-381. doi: 10.1111/1467-9671.00118, 2002.
- Wosniok, C.; Bensmann, F.; Lücker, M.; Lehfeldt, R. and Roosmann, R. (2014): Standardized Web Processing of Hydro-Engineering Operations. In Lehfeldt, R. and Kopmann, R. (Eds): Proceedings ICHE 2014, Hamburg, 1091-1098. <http://vzb.baw.de/e-medien/iche-2014/ICHE2014.html>, 2014.
- Wosniok, C.; Bensmann, F.; Wössner, R.; Kohlus, J; Roosmann, R.; Heidmann, C. and, Lehfeldt R. (2014): Standardized Web Processing. Geophysical Research Abstracts, Vol. 16, EGU2014-13365-2, EGU General Assembly, 2014.

#### 6 Veröffentlichungen

-/-





### **III. Neue FuE-Vorhaben in 2014**





## **Korrosionsschutzuntersuchungen – Vergleich Naturlagerung zu Labor**

**Netzplan-Nr.:** A39510270006

**Projektleiter:** Dr. G. Binder, Abteilung Bautechnik, Referat Stahlbau, Korrosionsschutz (B2)

**E-Mail:** guenter.binder@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Zur Einschätzung bzw. Evaluierung von Labortestverfahren für den Korrosionsschutz müssen diese mit Langzeitauslagerungen in der Natur vergleichbar sein. Diese Fragestellung beschäftigt seit langem auch die internationale Normung, wobei immer noch verlässliche Daten fehlen. Von den beiden Prüfarten können jedoch die Resultate wiederum nur dann sinnvoll verglichen werden, wenn Unterschiede in der Applikation der einzelnen Schutzsysteme ausgeschaltet werden. Bei diesem Vorhaben sollen deshalb erstmals beide Prüfplattenserien in denselben Beschichtungsvorgängen hergestellt und anschließend in der Natur und im Labor geprüft werden.

Korrosionsschutzbeschichtungen für Stahlwasserbauten der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) werden grundsätzlich nach Labortestverfahren der Richtlinien zur Prüfung von Beschichtungstoffen (RPB) geprüft und zugelassen. Den Laboruntersuchungen folgt noch ein Naturlagerungstest, u. a. um die Laborergebnisse zu verifizieren. Die Testdauer beträgt hierbei fünf Jahre.

Bei den bisher angestellten Vergleichen zwischen Labor- und Naturlagerungsversuchen (z. B. in (Binder, 2008)) zeigte sich eine gewisse Gleichsinnigkeit der Unterrostungstendenz. Allerdings ist die stat. Auswertung durch die beiden Extremwerte der Unterrostungen - mit und ohne Zink in der Grundbeschichtung - geprägt. Üblicherweise werden die Prüfplatten für die Langzeitauslagerung in der Natur (LZA, s. [2]) und für die Laborprüfung getrennt hergestellt. Die Notwendigkeit dieser Untersuchungen, neben dem grundsätzlichen Vergleich Labor zur Natur, ist nämlich auch dadurch gegeben, dass es wohl große Applikationseinflüsse beim Herstellen von beschichteten Prüfplatten gibt, wie sie zuletzt bei Korrosionsschutzprüfungen aufgefallen sind (Heins, 2014).

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Für die Bauwerke der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) müssen Korrosionsschutzstoffe für den Bauwerkserhalt bereitgestellt werden. Es ist zunächst zu prüfen, ob die Laborverfahren die Kriterien für brauchbare Schutzsysteme in ausreichender Differenzierung erfüllen. Im Detail ist zu prüfen, ob weitere bzw. neue Kriterien, die als typische Belastungen von Stahlwasserbauten in Betracht kommen, getestet werden müssten. Diese beinhalten z. B. die Belastung von Stahlwasserbauteilen durch Schlag und Stoß, welche bisher in keinem Regelwerk konsequent umgesetzt worden ist. Darüber hinaus müssen sich die Labortestverfahren an der Wirklichkeit messen. Hierzu dient u. a. der Vergleich von Laborergebnissen mit jenen der Langzeitauslagerungen in der Natur unter Ausschluss von Präparationseinflüssen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel der Untersuchungen ist es, einen Vergleich der Labortests mit praxisnahen Belastungen der Natur zu ermöglichen. Es ist vorgesehen, beschichtete Prüfplatten mit definierten Schutzsystemen verschiedener Hersteller mit jeweils identischer Applikation sowohl für die Langzeitauslagerung in der Natur wie auch für Kurzzeittests im Labor zu verwenden. Als ein relativ objektives Bemessungskriterium für die Schutzwirkung kann die Unterrostung an einer künstlichen Verletzung herangezogen werden. Da bei allen relevanten bisherigen Testverfahren die Unterrostung an der spezifischen künstlichen Verletzung (Riss bzw. Frässhchnitt) maßgeblich ist, ist zu prüfen, inwieweit noch praxisrelevantere Verletzungen, wie z. B. Stoß (s. Transport- oder Einbauschäden von Bauteilen), gefunden werden können. Neben der Vergleichbarkeit von Labor- und Naturlagerungs-Verfahren ist es Ziel dieser Untersuchungen, den „Beschleunigungsfaktor“ der verschiedenen Laborsimulationen gegenüber den Naturlagerungen zu berechnen.

## 2 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungen stützen sich auf unterschiedliche Vorgehensweisen, d. h. sowohl auf Labor- wie auch auf Naturlagerungsversuche. Das Hauptkriterium ist die jeweilige Unterrostungstiefe an den künstlichen Verletzungen (2 mm-Frässchnitt). Daneben sollen noch Unterrostungsprüfungen an den Versuchsblechen mit neuartiger künstlicher Verletzung, durch eine Schlagverletzung (Impact, z. B. DIN EN ISO 6272) durchgeführt werden. Diese erfolgt mit einem fallenden Gewicht und simuliert möglicherweise die Wirklichkeit von Schlagbeanspruchungen (Schiffstouchierung, Torausbau, mechanische Arbeiten am Verschlussorgan, Transportschäden) besser als ein Frässchnitt. Die Ergebnisse der Unterrostungen sollen statistisch ausgewertet werden um evtl. existierende Korrelationen zwischen den Testreihen zu ermitteln.

## 3 Ergebnisse

Nach neueren Erkenntnissen kann man davon ausgehen, dass die Applikation der Beschichtungsstoffe großen Einfluss auf das Untersuchungsergebnis der Labortestbelastung hat (BAW, 2013). Im ersten Teil dieses Untersuchungsprogramm konnten „überschüssige“ Prüfplatten, die für die verschiedenen Lokaltäten für Langzeitauslagerung (LZA; Kampagne 2008 bis 2013) hergestellt worden sind, in den Belastungsversuchen verwendet und die Unterrostungswerte von sechs Systemen (Nr. 1, 2, 8, 18, 19 und 21) ausgewertet werden. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der LZA und der Labortestreihe im direkten Vergleich der Systeme mit und ohne Zn-Staub-haltiger Beschichtung bezüglich ihrer Unterrostung an der künstlichen Verletzung (Frässchnitt). Zunächst fällt auf, dass die beiden Hauptgruppen - mit Zinkstaub-Grundierung („Zn-GB“) und ohne („Zn-frei“) - hinsichtlich des Labortests (DIN EN ISO 9227; Neutraler Salzsprühnebeltest) recht ähnlich verhalten (s. Tab. 1).

Prüfung System (Dauer)	Labor ISO 9227 (2 Monate)	LZA ÜW-Zone (5 Jahre)	LZA WW-Zone (5 Jahre)	LZA UW-Zone (5 Jahre)
Zn-GB (n=3)	1,9	5,7	8,5	0,6
Zn-frei (n=3)	2,2	34,4	18,0	3,2

Tabelle 1: Mittelwerte der Unterrostungstiefen in mm nach verschiedenen Belastungstests

Hingegen zeigen die Spalten 3 bis 5 deutliche Divergenz der Unterrostungswerte nach der fünfjährigen Langzeitauslagerung in der Natur: Hier schneiden die Schutzsysteme mit Zinkstaub-haltiger Grundbeschichtung in allen drei Zonen (ÜWZ=Überwasserzone, WWZ=Wasserwechselzone, UWZ=Unterwasser-zone) der Auslagerungsstätte Kiel deutlich besser ab. Weiterhin zeigt sich in Bild 1, dass es zwar Tendenzen von Abhängigkeiten gibt, jedoch keine nachweisbaren Zusammenhänge von Ergebnissen der Auslagerungen im Brackwasser (Kieler Förde) und jenen des Salzsprühnebels gibt: Die Korrelationskoeffizienten (r) liegen ständig unter 0,6 womit bei dieser geringen Probenanzahl (n=6) keine statistisch gesicherte Signifikanz einer Beziehung festgestellt werden kann.

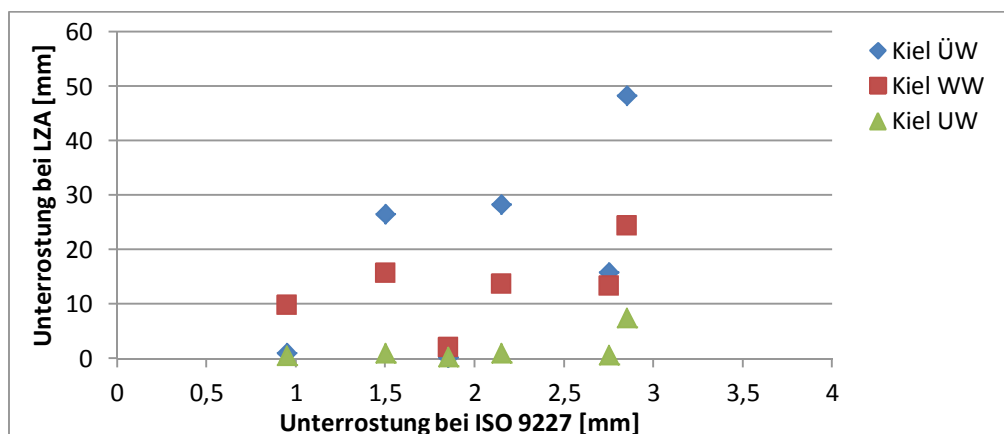


Bild 1: Variation der Unterrostungswerte im Labor (DIN EN ISO 9227) und in der LZA

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Nach der Prüftafelpräparation konnte mit den Laboruntersuchungen bereits Ende 2014 begonnen werden (s. Tab. 2). Hierbei wurden zunächst sechs von 30 Systemen geprüft. Bis die eigentlichen Vergleichsplatten der LZA-Versuchsserie 2013 bis 2018 zur Verfügung stehen, können also weitere Laborversuche, z. B. mit DIN EN ISO 9227 und auch ISO 20340 durchgeführt werden und mit den Resultaten der LZA-Kiel und begrenzt auch Windheim (Weser) verglichen werden. Zunächst wird jedoch mit einer Variante der Unterrostung - nach Schlagverletzung statt Frässschnitt - die Untersuchung weitergeführt. Ebenfalls in Tabelle 2 sind die geplanten Untersuchungen beschrieben.

Laufzeit des Vorhabens: 03/2014 bis 2019.

<b>Prüfverfahren</b>	<b>Start / Ende</b>	<b>Arbeiten</b>	<b>Anmerkung</b>
Langzeitauslagerung	2013 / 2018	Auslagerungsserie 2013 bis 2018	Drei Lokalitäten mit LZA- und Laborprüfplatten
Salzsprühnebeltest DINEN ISO 9227	2014 / 2015	Prüfplattenvorbereitung, Belastung und Auswertung	Auslagerungsserie 2008 bis 2013; Restplatten
Zyklustest – aging test ISO 20340	Mitte 2015	Prüfplattenvorbereitung, Belastung und Auswertung	Auslagerungsserie 2008 bis 2013; Restplatten
Schlagprüfung	Mitte 2015	Prüfplattenvorbereitung, Belastung und Auswertung	Unterrostungsmessung nach zusätzlicher Salzbelastung

*Tabelle 2: Versuchsbeispiele für Unterrostungstestverfahren nach versch. Belastungen*

#### 5 Literatur

- Binder, G. (2008): Determine usable coating systems – results of laboratory tests versus long term trials in nature; NACE corrosion 2008, New Orleans, paper 08001 (2008) 1-15  
 BAW (2013): Langzeitauslagerungsversuche von Beschichtungssystemen für den Stahlwasserbau 2008 bis 2013 (A.-Nr.: A395 102 10413), in Druck  
 Heins, O. (2014): Auswahl von Beschichtungsstoffen für OWEA; workshop des FA KOR der HTG, Hamburg Oktober 2014 (Tagungsband)

#### 6 Veröffentlichungen

- Binder, G.(2015): Vortrag bei der Jahrestagung Bundesverband Korrosionsschutz 2015 vorgesehen

## **Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für den Nachweis der Tragfähigkeit von Schlauchwehrrmembranen**

**Netzplan-Nr.:** A39510270007

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. R. Gurt, Abteilung: Bautechnik, Referat Stahlbau, Korrosionsschutz (B2)

**E-Mail:** ralf.gurt@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Wurden in der Vergangenheit ausschließlich Wehrverschlüsse aus Stahl eingesetzt, stellt sich das Schlauchwehr unter bestimmten Randbedingungen als Alternative dar. Ferner zeichnet sich ab, dass auch dieser Verschlusstyp als ein Standard für künftige Neubaumaßnahmen von Wehranlagen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung festgelegt wird.

Bislang gibt es weltweit keine einheitliche Methodik bei der Bemessung von Schlauchmembranen oder Normen, in denen das Sicherheitsniveau (z. B. Sicherheitsbeiwerte, Degradationsfaktoren) festgelegt wird. Eine Ausnahme ist Japan, wo es eine Richtlinie zur Planung von Schlauchwehren gibt, ohne dabei im Detail auf die Bemessung einzugehen. Daneben berichten nur Van der Horst & Rövekamp (2001) über die Bemessung des Sturmflutwehres Ramspol in den Niederlanden. In Deutschland existiert kein einheitliches Bemessungskonzept für Schlauchwehre. Eine Zustimmung im Einzelfall wäre für jeden Neubau erforderlich. Dies hätte unterschiedliche Sicherheitsniveaus zur Folge.

Die zur Anwendung kommenden Schlauchwehrrmembranen weisen ein nichtlineares anisotropes Materialverhalten auf. In der statischen Berechnung wird stark vereinfacht ein linear-elastisches Materialverhalten angenommen, welches je nach Wahl der Steifigkeitsparameter einen großen Einfluss auf die ermittelte Beanspruchung haben kann. Daher ist die Ermittlung der fiktiven elastischen Materialeigenschaften der für die Verwendung von Schlauchwehren geeigneten Membranen erforderlich.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung wird zukünftig alte Wehranlagen durch neue ersetzen müssen. Dabei wird es auch zur Planung und Ausführung von Schlauchwehren kommen (z. B. Wehr Beihingen, Wehr Obernau). Um ein ausreichendes und einheitliches Sicherheitsniveau an den Anlagen der WSV zu erhalten und die Planungs- und Genehmigungsverfahren zu vereinfachen, ist das Vorhandensein eines Bemessungskonzeptes für den Nachweis der Tragfähigkeit von Schlauchwehrrmembranen und die Kenntnis deren Steifigkeitsparameter von großer Bedeutung.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel des FuE-Vorhabens ist es, für die zur Anwendung geeigneten Membranen die Steifigkeitsparameter zu ermitteln, mit denen eine möglichst realitätsnahe Beanspruchung ermittelt werden kann. Anschließend soll ein eurocodekonformes Bemessungskonzept für Schlauchwehrrmembranen entwickelt werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Durch Materialversuche sind Kraft-Verformungskurven zu ermitteln, die als Grundlage für die Bestimmung der Steifigkeitsparameter dienen. Diese Materialeigenschaften werden durch Zug- und Druckversuche ermittelt und gegebenenfalls durch biaxiale Zugversuche ergänzt werden. Anschließend werden numerische Simulationen der Beanspruchungszustände von Schlauchmembranen mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode durchgeführt. Hierzu kommen kommerzielle Softwares zum Einsatz. Materialgesetzte, Belastungen und Kontakteigenschaften werden hier für die Berechnung hinterlegt. Relevante Spannungen werden ausgewertet und zur Bestimmung von Spannungskonzentrationen verwendet. Bereits bestehende Untersuchungen (Abteilung W (Gebhardt, 2006), etc.) werden dabei berücksichtigt. Naturmessungen können (zur Verifizierung einzelner Ergebnisse) gegebenenfalls herangezogen werden.

### 3 Ergebnisse

Die analytischen Ergebnisse der Membrankraft in Umfangsrichtung aus (Gebhardt, 2006) können mit der FE-Lösung bestätigt werden. Dabei sind die Materialparameter und die Querschnittswerte von untergeordneter Rolle.

Der Aufbau des FE-Modells mit Schalenelemente führt zu einer Spannungserhöhung im Bereich der Auflager und Falten. Diese Spannungen hängen sehr von Materialparametern und Querschnittswerten ab, siehe auch (Gurt, 2013).

Die Schlauchmembrane besteht aus elastomerbeschichteten Geweben. Die Gewebeeinlagen, aus Polyester oder Polyamid bestehend, können nur auf Zug belastet werden. Der Beschichtungstoff (EPDM, ...) ist zugschlaff und dient nur zum Schutz der Gewebeeinlagen und zum Abdichten des Schlauchvolumens. Die Inkompessibilität der Elastomere ( $\nu \approx 0,5$ ) führt zur Aufnahme von Druck in den Deckschichten. Somit kann sich im Falten- und Auflagerbereich ein Kräftepaar in den beiden Materialien ausbilden, ähnlich des Stahlbetons.

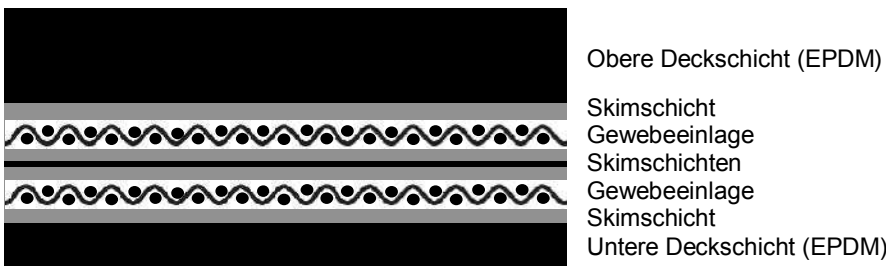


Bild 1: schematische Darstellung einer 2-lagigen Schlauchmembran

Die obere Deckschicht, siehe Bild 1, ist deutlich dicker, was zu einer Erhöhung des inneren Hebelarms führt. Im Bereich der Auflager liegt diese Deckschicht im Druckbereich, was hier zu großen Spannungskonzentrationen führt. In Bild 2 ist eine solche Spannungserhöhung in Rot zu erkennen, dunkelblaue Bereiche sind hierbei spannungsfrei.

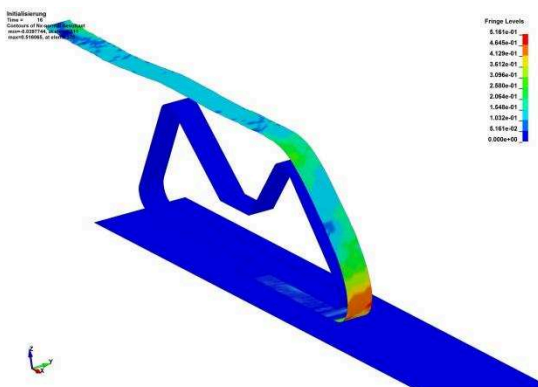


Bild 2: Detailmodell Auflagerschiene – Membranstreifen um die Schiene mit gewählter Umfangsspannung gezogen – höchste Spannung in Rot, keine Spannung in Dunkelblau

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2014: Sichtung relevanter Unterlagen und Veröffentlichungen, Ermittlung bemessungsrelevanter Materialkenngrößen, FE-Modellaufbau mit kommerzieller Software

2015: Weiter Bestimmung Materialkenngrößen, Implementierung der Kenngrößen in FE-Software, Detailmodellierung, Bestimmung von Degradationsfaktoren

2016: Aufstellung maßgebender Lastfälle, Parameterstudie für ausgewählte Wehrgeometrien und Steifigkeitsparameter mit Bestimmung von Spannungen und Spannungskonzentrationsfaktoren, Aufstellung eines Bemessungskonzeptes

Laufzeit des Vorhabens: 2014 bis 2017.

#### **5 Literatur**

Van der Horst, A.Q.C., Rövecamp, N.H. (2001): Design of the Storm Surge Barrier Ramspol, The Netherlands. The Netherlands. HTC Congress 2001

Gebhardt, M. (2006): Hydraulische und statische Bemessung von Schlauchwehren. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Wasser und Gewässerentwicklung - Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik. Dissertation. 2006.

Gurt, R. (2013): Untersuchungen zur Spannungskonzentration und Faltenbildung bei Schlauchwehren mit Hilfe nichtlinearer FEM-Analysen. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Mechanik. Diplomarbeit. 2013

#### **6 Veröffentlichungen**

-/-

## **Instandsetzung von Schleusenanlagen unter Betrieb (IuB)**

**Netzplan-Nr.:** A3950370011

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. A. Westendarp, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** andreas.westendarp@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die WSV verfügt über insgesamt 267 Schleusenanlagen mit lediglich einer Schleusenkammer. Von diesen Einkammerschleusenanlagen sind 121 bereits über 80 Jahre, von diesen wiederum 85 sogar über 100 Jahre alt. Gemäß Bauwerksinspektion weisen 42 % der 267 Einkammerschleusen eine Zustandsnote über 3,0 bis 3,5 und 30 % eine Zustandsnote über 3,5 bis 4,0 auf. Angesichts der Altersstruktur und des baulichen Zustandes zeichnet sich bei diesen Bauwerken kurz- und mittelfristig ein erheblicher Instandsetzungsbedarf ab, sofern eine weitere mittel- oder langfristige Nutzung der Schleusenanlagen beabsichtigt wird.

Die Durchführung grundlegender Instandsetzungsmaßnahmen an Massivbau oder Stahlwasserbau bedingt bei Schleusenanlagen mit nur einer Schleusenkammer bislang eine Außerbetriebnahme der gesamten Schleusenanlage und damit eine Unterbrechung zumindest der durchgängigen Schifffahrt auf der zugehörigen Wasserstraße. Für die Grundinstandsetzung des Massivbaus einer Schleusenanlage mit konventionellen Bauverfahren sind selbst unter günstigen Randbedingungen Mindestbauzeiten von etwa ein bis zwei Jahren (reine Bauzeit) erforderlich. Der Zustand einzelner Schleusenanlagen an einer Wasserstraße differiert selbst bei gleicher oder annähernd gleicher Bauweise und Errichtungszeit stark, ein unmittelbarer Instandsetzungsbedarf der einzelnen Schleusenanlagen an einer Wasserstraße tritt unter rein technischen Gesichtspunkten im Regelfall zu sehr unterschiedlichen Zeitpunkten auf. Die gleichzeitige, zumindest teilweise prophylaktische Instandsetzung aller Schleusenanlagen an einer Wasserstraße innerhalb einer bestimmten Sperrzeit von beispielsweise 2 Jahren dürfte vor diesem Hintergrund genauso wenig ein akzeptabler Weg sein wie wiederkehrende Unterbrechungen der Schifffahrt immer dann, wenn eine weitere Anlage zur Instandsetzung ansteht.

Vor diesem Hintergrund ist die Frage zu beantworten, ob umfassende Instandsetzungsmaßnahmen an Schleusenanlagen zur Sicherstellung einer weiteren mittel- oder langfristigen Nutzung nicht auch unter Schifffahrtsbetrieb bzw. innerhalb bestimmter Zeitfenster, in denen die Schifffahrt kurzzeitig unterbrochen wird, realisiert werden können.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Ein Ersatzneubau einzelner instandsetzungsbedürftiger Schleusenanlagen parallel zum weiterlaufenden Betrieb der vorhandenen Anlage dürfte zwar realisierbar sein, nicht aber ein Ersatzneubau in dem Umfang, wie er sich angesichts Altersstruktur und baulichem Zustand der insgesamt 267 Einkammerschleusenanlagen abzeichnet.

Für die Binnenschifffahrt ist eine mit jeder grundlegenden Instandsetzung an Einkammerschleusenanlagen verbundene ein- oder mehrjährige Unterbrechung zumindest des durchgängigen Verkehrs auf der entsprechenden Wasserstraße nicht akzeptabel. Umfahrungsmöglichkeiten bestehen im Regelfall nicht bzw. bedingen einen erheblichen wirtschaftlichen Mehraufwand. Derartige Szenarien würden mit größter Wahrscheinlichkeit zu Abwanderungen zu anderen Verkehrsträgern führen, welche nur schwer reversibel zu machen wären.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Mit diesem Vorhaben wird das Ziel verfolgt, geeignete Ansätze für eine Instandsetzung von Schleusenanlagen unter Betrieb, also innerhalb zu definierender Zeitfenster pro Tag zu identifizieren, weiter zu entwickeln und zu verifizieren bzw. neue Ansätze zu erarbeiten. Der Kostenaufwand für die Realisierung derartiger Instandsetzungsmaßnahmen als Eingangsgröße für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ist zu ermitteln.



Der WSV sollen Instandsetzungslösungen für die einzelnen Bauteile und unter Berücksichtigung typischer, kategorisierter Randbedingungen an die Hand gegeben werden. Die technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten und Grenzen dieses Ansatzes sollen aufgezeigt werden.

Die unter Betrieb zu realisierenden Instandsetzungsverfahren sollen im Hinblick auf die Verlängerung der Restnutzungsdauer des instand zu setzenden Bauteils bzw. Bauwerks gleichwertig zu vergleichbaren, unter konventionellen Randbedingungen durchgeführten Instandsetzungsmaßnahmen sein.

Das Gesamtkonzept „Instandsetzung unter Betrieb“ ist nur dann zielführend, wenn alle instand zu setzenden Bauteile innerhalb der vorgegebenen Zeitfenster bearbeitbar sind, eine längerfristige Sperrung der Schleusenanlage auch nur für die Instandsetzung eines einzigen Bauteils also nicht erforderlich wird.

## 2 Untersuchungsmethoden

Um künftig eine Instandsetzung von Einkammerschleusen unter Betrieb möglich zu machen, müssen die vorliegenden Erkenntnisse auf diesem Themengebiet zusammengetragen und weitergehende Untersuchungen angestellt werden. Dabei ist eine modulare Betrachtung der verschiedenen Bauwerksteile (z. B. Kammerwände, Sohle, Unterhaupt, Oberhaupt) sinnvoll. Es müssen für die einzelnen Bauwerksteile angemessene, voraussichtlich unterschiedliche Instandsetzungsansätze und -verfahren betrachtet werden. Hierbei ist die gesamte Bandbreite bauwerks- und standortabhängiger Randbedingungen von Einkammerschleusenanlagen der WSV wie beispielsweise Altbetonqualität, Bewehrungssituation oder Hubhöhe zu analysieren und zu berücksichtigen. Auf diese Weise soll ein Baukastensystem mit Instandsetzungslösungen für die wesentlichen Bauteile und Randbedingungen bei Einkammerschleusenanlagen entwickelt und der WSV als Planungs- und Ausschreibungsbasis zur Verfügung gestellt werden. Die einzelnen Instandsetzungslösungen sollen möglichst bis hin zu Pilotprojektebene realisiert und begleitet werden.

Neben theoretischen Betrachtungen sowie Untersuchungen im Labor- und Bauteilmaßstab soll im Rahmen eines Pilotprojekts (Schleuse Schwabenheim, Neckar) eine komplette Grundinstandsetzung und Verlängerung einer Schleuse unter Betrieb durchgeführt werden. Die Instandsetzung soll alle wesentlichen Bauwerkelemente (Kammerwände, Sohle, Häupter, Stahlwasserbau, Einbauteile) umfassen. Auf diese Weise sollen ein grundsätzlicher Nachweis der Machbarkeit einer Instandsetzung unter Betrieb erfolgen und etwaige Schwierigkeiten bei der baulichen Umsetzung identifiziert werden. Die für das Pilotprojekt Schleuse Schwabenheim zu entwickelnden Instandsetzungslösungen sollen in das zu erstellende Baukastensystem integriert werden.

Vor diesem Hintergrund wird das FuE-Vorhaben in zwei Teile gegliedert:

- Teil A: Erarbeitung modularer Lösungsansätze für die Instandsetzung von Einkammerschleusenanlagen unter Betrieb
- Teil B: Erarbeitung von Lösungsansätzen für die Instandsetzung der Schleuse Schwabenheim/linke Kammer unter Betrieb; Begleitung des Pilotprojekts

Für die Bearbeitung von Teil B soll eine Verknüpfung dieses Projektes mit dem WSV-Projekt „Grundinstandsetzung und Schleusenverlängerung Schleuse Schwabenheim“ des Amt für Neckar- ausbau Heidelberg (ANH) unter Nutzung der hierfür verfügbaren Ingenieurbürokapazitäten erfolgen.

Um sicherzustellen, dass neben den theoretischen und praktischen Erfahrungen der BAW in den Bereichen Bautechnik, Geotechnik und Wasserbau auch die Erfahrungen der WSV im Bereich der Grundinstandsetzung bestehender Schleusen in die Untersuchungen einfließen, soll das Gesamtvorhaben in Kooperation zwischen der BAW und dem Amt für Neckar- ausbau Heidelberg (ANH) als Neubauamt mit ausgeprägten Erfahrungen in der Instandsetzung von Schleusen durchgeführt werden. Das in allen Phasen des Projektes in besonderer Weise erforderliche baubetriebliche Wissen soll firmenneutral über eine Kooperation mit dem Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) eingeholt werden. Die Bearbeitung des Gesamtvorhabens soll im Rahmen einer Projektgruppe mit Mitarbeitern aus BAW, ANH und KIT erfolgen.

### 3 Ergebnisse

Teil A:

Die Sachstandsberichte „Partielle Trockenlegung von Schleusenkammern in nächtlichen Sperrpausen“ und „Prinzipielle Lösungen zur temporären Trockenlegung von Schleusenkammern“ liegen vor.

Teil B:

Für die Instandsetzung der Kammerwände der Schleuse Schwabenheim wurde eine Variantenanalyse durchgeführt.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015: Analyse der Randbedingungen von Einkammerschleusenanlagen der WSV  
Konzeption Instandsetzung Pilotprojekt Schleuse Schwabenheim  
Erarbeitung weiterer Instandsetzungslösungen (außer Schleuse Schwabenheim)

2016: Konzeption Instandsetzung Pilotprojekt Schleuse Schwabenheim  
Erarbeitung weiterer Instandsetzungslösungen (außer Schleuse Schwabenheim)

2017: Begleitung Ausführungsplanung/Ausschreibung Pilotprojekt Instandsetzung Schleuse Schwabenheim  
Erarbeitung weiterer Instandsetzungslösungen (außer Pilotprojekt Schleuse Schwabenheim)  
Nach Möglichkeit Realisierung weiterer Pilotprojekte

2018: Begleitung Ausführung Pilotprojekt Schleuse Schwabenheim (Beginn)  
Erarbeitung weiterer Instandsetzungslösungen (außer Pilotprojekt Schleuse Schwabenheim)  
Nach Möglichkeit Realisierung weiterer Pilotprojekte

2019: Abschlussbericht

Laufzeit des Vorhabens: 2014 bis 2019

*Anmerkung: Zeitliche Abhängigkeit von der Realisierung des Pilotprojekts Schleuse Schwabenheim*

### 5 Literatur

-/-

### 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Entwicklung von Verfahrensweisen zur Simulation bewegter Objekte mit OpenFOAM**

**Netzplan-Nr.:** A39530370004

**Projektleiter:** Fabian Belzner, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich (W),  
Referat Wasserbauwerke (W3),

**E-Mail:** fabian.belzner@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Gegenständliche Modelle haben im Vergleich zu hydronumerischen Modellen den Vorteil, dass an einem bestehenden Modell eine Vielzahl von Betriebsvarianten in kurzer Zeit untersucht werden können. Beispielsweise nimmt die Simulation eines Schleusenfüllprozesses nur wenige Minuten in Anspruch, während die detaillierte hydronumerische Simulation einen Rechenzeitaufwand von mehreren Tagen bedeuten kann. Vor dem Hintergrund immer effizienterer Großrechner und numerischer Verfahren wird dieser zeitliche Vorteil zukünftig geringer werden. Trotzdem werden gegenständliche Modelle weiterhin ein unverzichtbares Werkzeug zur Untersuchung und zum Verständnis hydromechanischer Phänomene darstellen, denn gegenständliche Modelle bieten einen unvergleichlich intuitiven Zugang zu den strömungsmechanischen Prozessen in ihrer Gesamtheit. Auch erlauben es gegenständliche Modelle auf geradezu selbstverständliche Art und Weise die Interaktion zwischen bewegten Festkörpern (Schütze, Wehrverschlüsse, Schiffe) und der Strömung zu untersuchen. Während die rein strömungsmechanischen Probleme im Bauwerksnahfeld oftmals in guter Qualität und Geschwindigkeit mit numerischen Werkzeugen behandelt werden können, stellt der Themenkomplex der bewegten Objekte noch immer einen Bereich dar, der nur mit Expertenwissen und für ausgesuchte Fragestellungen mit numerischen Modellen bearbeitbar ist.

In der Abteilung W anfallende Fragestellungen werden sowohl mit gegenständlichen Modellen, als auch mit numerischen Methoden untersucht. Somit ist es möglich für jede Fragestellung die geeignetste Untersuchungsmethode zu wählen.

In der Abteilung W soll der Einsatz des als Open-Source-Software verfügbaren Verfahrens OpenFOAM (Rusche, 2002) verstärkt werden. Momentan wird in den Referaten W1 und W3 bereits ein Großteil der numerischen Untersuchungen mit OpenFOAM bearbeitet, im Referat W4 laufen bereits erste Tests. Während die Durchführung von Simulationen mit ortsfesten Objekten unproblematisch ist, gibt es bisher nur für Einzelfälle Vorgehensweisen zur Simulation von Festkörperbewegungen in OpenFOAM. Häufige in der Abteilung W anfallende Fragestellungen sind die Simulation von fahrenden Schiffen in beschränkten Gewässern, von bewegten Verschlüssen oder eines Schleusenfüllprozesses mit einem eingeschränkt beweglichem Schiff in der Schleuse (vgl. Thorenz und Anke, 2013). Diese Fragestellungen stellen einen besonderen Schwierigkeitsgrad dar, da die Abstände zwischen bewegtem Objekt und festen Berandungen oft klein sind.

Im Rahmen der Projektarbeit mit numerischen Simulationsmethoden in der BAW wurden bisher die Methoden „Morphing“, „Chimera Grid / Overset Grid“ und „Generalized Grid Interface / Sliding Interface“ eingesetzt. Dabei zeigte sich, dass diese Methoden für einige Fragestellungen geeignet einzusetzen sind (Overset: Frei fahrendes Schiff, Sliding Interface: Drucksegment, Propeller), andere Fragestellungen (Schiff in der Schleuse während der Füllung) jedoch nur schwer umzusetzen sind. Insgesamt ist das Simulieren von bewegten Objekten in allen numerischen Verfahren noch kein Standardproblem, sondern für jeden einzelnen Anwendungsfall mit unterschiedlichen Methoden zu bearbeiten. Die in OpenFOAM vorhandenen Ansätze für die Simulation von bewegten Objekten weisen großes Potential auf, sind bisher aber nur in Einzelfällen für die Anforderungen der BAW adaptiert und getestet worden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Fragestellungen aus der WSV, wie beispielsweise die Simulation von fahrenden Schiffen in beschränkten Gewässern, von bewegten Verschlüssen oder eines Schleusenfüllprozesses mit einem eingeschränkt beweglichem Schiff in der Schleuse, die bisher einzig auf Grund der Anforderungen an

die Modellierung bewegter Objekte im Labor untersucht werden mussten, könnten mit den zu entwickelnden Methoden auch mit einer numerischen Untersuchung beantwortet werden. Langfristig ist zu erwarten, dass damit die Effizienz und Qualität der Bearbeitung gesteigert werden kann.

### 1.3 Untersuchungsziel

Ziel der Untersuchung ist die Entwicklung und/oder Implementierung einer oder mehrerer Verfahrensweisen, mit denen in der Abteilung W anfallende Fragestellungen zur Simulation bewegter Objekte mit OpenFOAM bearbeitet werden können. Es ist heute möglich, strömungsmechanische Berechnungen mit OpenFOAM mit vertretbarem Zeitaufwand durchzuführen. Gleiches soll für die Simulation bewegter Objekte gelten. Zukünftig soll es ermöglicht werden, bewegte Objekte in gleicher Weise in der Projektarbeit zu berücksichtigen wie feste Objekte.

### 2 Untersuchungsmethoden

Für die zu bearbeitende Fragestellung werden numerische Verfahren verwendet. Bereits bestehende numerische Verfahren werden gegebenenfalls weiterentwickelt und neue hinzugefügt. Zur Validierung des entwickelten Verfahrens stehen in W3 Labormodelle zur Verfügung, an denen entsprechende Messungen durchgeführt werden können.

### 3 Ergebnisse

Das Forschungsvorhaben wurde im November 2014 gestartet. Dazu wurde eine FuE-Stelle ausgeschrieben, die ab Mitte Januar 2015 besetzt werden konnte.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2015 – 2015: Literaturrecherche / Grundlagenerarbeitung  
Tests der bisher in OpenFOAM verfügbaren Bibliotheken zur Simulation von bewegten Objekten.  
Bewertung der bisher verfügbaren Bibliotheken in Hinblick auf die Anforderungen der BAW.
- 2015 – 2016: Vorbereitung erster Vergaben.  
Erstellen eines Konzepts zur Entwicklung eigener Methoden.  
Durchführung eigener Entwicklungen.
- 2016 – 2017: Enge Betreuung der Vergaben.  
Durchführung eigener Entwicklungen.  
Konferenzbeitrag.  
Vergleich der entwickelten Methode mit kommerziellen Verfahren (z. B. Ansys Fluent oder CD-adapco STAR-CCM+).  
Vergleich mit der netzunabhängigen GPU-parallelisierten Smoothed Particle Hydrodynamics (GPUSPH) Methode. Diese Methode wird momentan im Rahmen eines FuE-Projekts im Referat W5 in Hinblick auf die Anwendung auf verkehrswasserbauliche Fragestellungen evaluiert und adaptiert.
- 2017 – 2018: Projektrelevanter Anwendungsfall.  
Validierung der entwickelten Methode durch die Simulation einer Schleusenfüllung mit bewegtem Schiff und den Vergleich mit den Ergebnissen des Schleusenversuchsstands I in Halle III oder des Schleusenversuchsstands II in Halle V.  
Bericht, ggf. Promotionsarbeit.  
Journal Paper.

Laufzeit des Vorhabens: 11/2014 bis 2018.

## 5 Literatur

Rusche, H. (2002): Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions. Doctoral Thesis. Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, Great Britain. Department of Mechanical Engineering.

Thorenz, C., Anke, J. (2013): Evaluation of ship forces for a through-the-gate filling system. In: Philippe Rigo, Milou Wolters: Proceedings, SMART Rivers Conference 2013, 23.-27.09.2013, Maastricht/Liège, Belgien.

## 6 Veröffentlichungen

-/-

**Modellierung des „human-factor“ bei der Fahrrinnenbemessung****Netzplan-Nr.:** A39530470006**Projektleiter:** M. Paprocki, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W4)**E-Mail:** michael.paprocki@baw.de**1 Problemdarstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Zeichnet man Schiffspfade auf, stellt man fest, dass die Schiffe mehr oder weniger um eine mittlere Kursachse pendeln. Die Fahrt eines Binnenschiffes ist somit im Grundsatz instabil, wobei der Pendelausschlag umso größer ist, je mehr Platz die Schiffsführer für Manöver zur Verfügung haben, je schlechter sie sich orientieren können und je unaufmerksamer sie fahren bzw. aufgrund der Verkehrssituation fahren können. Diese Pendelausschläge sind somit ein „human-factor“, die bei der Fahrrinnenbemessung zu beachten sind, wobei es auch physikalische Ursachen gibt wie die Turbulenz in einem Fließgewässer oder Ansaug- und Abstoßvorgänge zum Ufer und auf die der Schiffsführer mehr oder wenig gut und schnell reagiert (aus VBW 2013). Um die Befahrbarkeitsanalysen an Binnenwasserstraßen zu objektivieren, muss der „human-factor“-Anteil am Verkehrsflächenbedarf genauer eingeschätzt, mit geringem Aufwand quantifiziert und für anzustrebende Leichtigkeits- und Sicherheitsstandards bemessen werden. Hierfür ist die realitätsnahe Abbildung der Befahrbarkeit auf Teilabschnitten der Binnenwasserstraßen, unter Berücksichtigung des „human-factors“, notwendig, insbesondere mit großen Fahrzeugen und bei kritischen Fahrwasserhältnissen wie bei Niedrig- und Hochwasser (siehe Söhngen und Paprocki 2013 und Söhngen et al 2014). Der Einfluss des „human-factor“ auf die Fahrrinnenbemessung wird dabei derzeit durch die Auswertungen von Naturerhebungen mit CFAA (Frequenzanalyse) ermittelter Schlingelfahrtbreiten berücksichtigt.

Zum Stand des Wissens hinsichtlich der Modellierung des „human-factor“ in Simulationsverfahren wird auf die Ausarbeitungen des Instituts für Mensch-Maschine-Systemtechnik der Universität Kassel (MMS) verwiesen. Die fachwissenschaftlichen Grundlagen der Schlingelfahrt und damit der wichtigsten Komponente des „human-factor“-Anteils der Fahrrinnenbemessung sind in VBW 2013 beschrieben.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit, sowie Erhaltung der Leistungsfähigkeit des Verkehrsträgers Wasserstraße, geht mit einer Objektivierung der Befahrbarkeit einher.

**1.3 Untersuchungsziel**

Das Ziel des FuE-Vorhabens ist die Entwicklung einer Formel zur Beschreibung der Mensch-Maschine-Umwelt-Interaktion für die Bemessung der Zusatzbreiten aus Instabilitäten bzw. Schlingelfahrt während des Fahrprozesses unter Einbeziehung möglicher Lag-Effekte, auf Grund von Trägheitseffekt (Schiff), Reaktionszeit (Schiffsführer), etc.

Die zu entwickelnden Ansätze sollen eine Wahrscheinlichkeitsaussage zur Überschreitung eines bestimmten, auf „human-factor“-Einflüsse zurückgehenden (also überwiegend nicht-deterministischen) Verkehrsflächenbedarfs, erlauben. Darauf aufbauend soll eine Zuordnung zu Leichtigkeits- und Sicherheitsstandards, wie sie von der PIANC WG 141 vorgeschlagen werden, erfolgen.

Die entstehenden Ansätze sollen weiterhin genutzt werden, um die „human-factor“-Ansätze in dem in der Entwicklung befindlichen Verkehrssimulationsmodell für den Rhein zu testen (Kooperation mit der Uni Dresden). Schließlich ist künftig auch an eine Koppelung mit dem BAW-Schiffsführungssimulator gedacht.

## 2 Untersuchungsmethoden

Die unter 1.1 skizzierten Auswertungen beobachteter Zusatzbreiten sollen einer weiterführenden Analyse unterzogen werden, um mögliche deterministische Abhängigkeiten, wie sie sich aus der Analyse der ERDC-Daten (siehe ERDC 1982) ergaben, zu extrahieren. Ziel ist es, einen möglichst fundamentalen Zusammenhang relevanter Einflussparameter (für den Breitenanteil aus Instabilität) zu ermitteln und mit Leichtigkeits- und Sicherheitsstandards zu verknüpfen.

Weiter sollen Vorarbeiten zur Modellierung des „human-factor“ in Verkehrssimulationsmodellen geleistet werden. Diese werden vom Institut für Wirtschaft und Verkehr (IWV) der Uni Dresden (Lehrstuhl für Verkehrsökonomie und Statistik) im Auftrag der BAW für den Auftrag „Fahrrinnenbreitenbedarf am freifließenden Rhein“ erstellt. Zu diesem Punkt sollen in einem ersten Schritt relevante Einfluss- bzw. Kenngrößen für die Modellierung eines Schiffsführers auf Grundlage empirischer Daten identifiziert werden. Um die für das Fahrverhalten relevanten Informationen und Kenngrößen zu erhalten, wird auf die bestehende Datengrundlage aufgebaut und diese gegebenenfalls um weitere Versuchsfahrten ergänzt.

Im nächsten Schritt erfolgt die Aufbereitung der Daten mit Blick auf relevante Kennzahlen und etwaige Toleranzbereiche, um sie in den Prozess der Kursüberwachung einbinden zu können. Hierbei findet eine zyklische Kursüberwachung statt, die durch Informationen zur Umwelt (Verkehr, Flussverlauf, Störfaktoren), zum Schiff (u. a. Position und Beschleunigungen) und des Schiffsführers (Langzeitgedächtnis: Streckenkenntnis und Schiffsverhalten; Kurzzeitgedächtnis: zurückliegende Korrekturmaßnahmen und -Handlungen) gespeist ist. Die hierbei stattfindende Gewichtung und Einbeziehung der vorhandenen Informationen spiegelt das Fahrverhalten des Schiffsführers (unter den obliegenden Restriktionen) wieder.

Dieser Prozess soll die menschliche Informationsverarbeitung, d. h. den Wahrnehmungsprozess inkl. Gedächtnis und Wahrnehmungsfehler (Bewertung der Situation und der Reaktion) darstellen. Die Eigenschaften des Schiffsführers werden dann über Toleranzparameter der jeweiligen Kennzahl abgebildet.

Zu klären sind Häufigkeit (In welchem zeitlichen Abstand werden die permanent vorhandenen Informationen abgerufen und wahrgenommen?) und Art (Welcher Information wird Vorrang gewährt?) der Kursüberprüfung in Abhängigkeit des Vorwissens. Daraus ergeben sich die folgenden Fragen. Wie weit ist die Vorausschau bzgl. der Umweltbedingungen (Flussverlauf, Streckenkenntnis, Verkehr, ...) und wie genau werden diese erfasst? Ab welcher Größe werden Abweichungen vom geplanten SOLL-Kurs als solche erkannt und korrigiert? Wie genau wird die Schiffsposition im Querprofil erfasst? Wie groß ist die zeitliche Verzögerung der Reaktion auf eine erfasste Abweichung und wie gut ist die Korrekturmaßnahme? Muss die Korrekturmaßnahme überprüft werden? Diese Arbeiten sollen in engster Abstimmung mit den Entwicklern des Verkehrssimulationsmodells erfolgen.

## 3 Ergebnisse

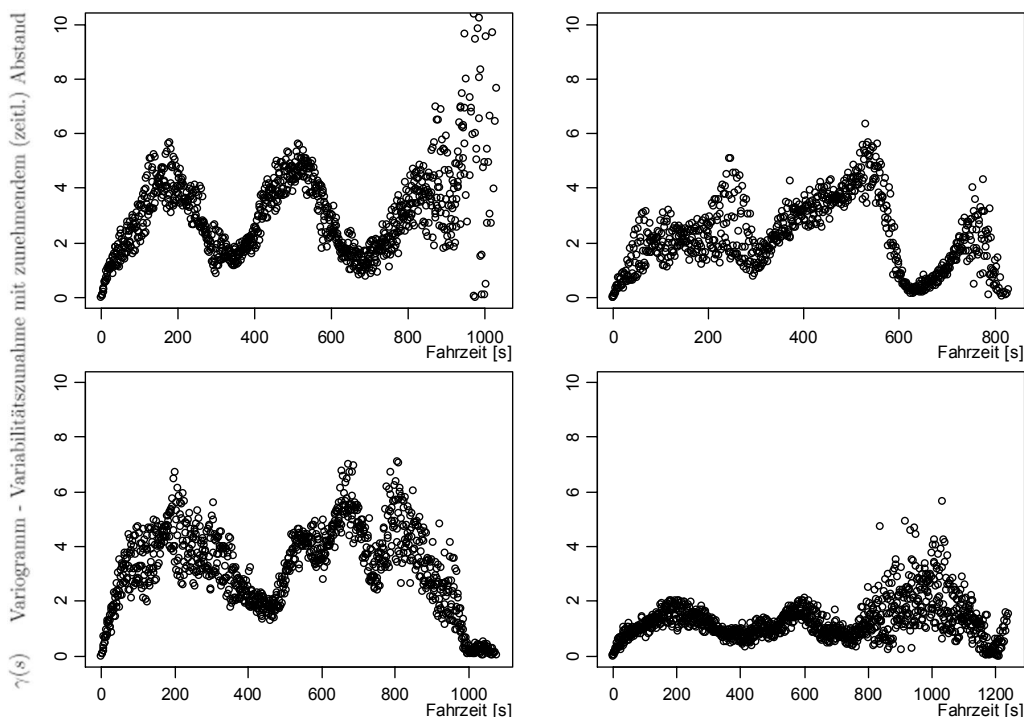
Für die Identifizierung von Abhängigkeiten der Einflussgrößen auf die Verteilungsparameter/-funktion der Zusatzbreite aus Instabilitäten wurden in einem ersten Schritt vorhandene Naturuntersuchungen am Neckar herangezogen. Den verwendeten Messdatensätzen eines Schiffes in Berg- und Talfahrt auf unterschiedlichen Gewässerabschnitten liegen geringe Strömungsgeschwindigkeiten und große Kurvenradien zu Grunde. Ziel der verwendeten Messungen war es, mögliche Lag-Effekte und Interaktionen, hier Autokorrelationsstruktur des Breitenanteils aus Instabilität, abzubilden unter Beibehaltung einer einheitlichen Schiffsabmessung und einer größtmöglichen Reduzierung der Einflüsse von Strömung und Kurvenfahrt. Hierbei wurde das von Burgers und Kok 1989 verwendete Moving-Average-Modell aufgegriffen. Grundannahme dabei ist, dass die Einflusststruktur nur in die Zukunft gerichtet ist. Der Zusammenhang zweier Breiten des Steuerprozesses sollte bei unterschiedlichen zeitlichen Abständen unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Daher wurde versucht die Abhängigkeitsstrukturen (gerichtet, bezogen auf die Differenz der Wegstrecke bzw. zugehörigen Fahrzeit) mittels eines Korrelogramms bzw. Variogramms in funktionaler Form zu erfassen (Paprocki 2010). Idealerweise nimmt mit zunehmendem räumlichen bzw. zeitlichen Abstand die (Auto-)Korrelation ab bzw. die Vari-

abilität zu (Hattermann und Roers). Gängige funktionale Ansätze für die Modellierung der Autokorrelation sowie Güteaussagen sind in Goovaerts 1997 beschrieben.

Die in Bild 1 dargestellten empirischen Variogramme der Abhängigkeitsbeziehung der Zusatzbreite aus Instabilitäten weisen alle einen mehr oder minder starken „hügelartigen“ Verlauf (Hole-Effekt (Hattermann und Roers)) über die Zeit auf. Der relativ starke erste Anstieg kann durch einen möglichen (nicht unmittelbar eintretenden) Lag-Effekt erklärt werden. Durch die Trägheit des Schiffskörpers bzw. anderweitiger Verzögerungseinflüsse weisen die Zusatzbreiten in diesem zeitlichen Fenster eine hohe Variabilität auf. Das bedeutet sie bedingen sich in diesem Bereich (erster „Peak“) des zeitlichen Versatzes nur wenig. Der zweite Anstieg stellt das Zeitfenster nach dem Lag-Effekt dar. Hier machen sich zeitlich verzögert die Auswirkungen minimaler Steuerimpulse bzw. Fehlstellungen, Wind, Wellengang, usw. in den Zusatzbreiten bemerkbar. Es ist aber zu hinterfragen, ob in der Geradeausfahrt ohne Strömungseinfluss ein möglicher Lag- bzw. Verzögerungseffekt 300 Sekunden (5 Minuten) vorhält. Zudem sind der dritte Anstieg und das Abfallen der empirischen Funktion, das heißt, eine Abnahme der Variabilität, mit zunehmendem zeitlichem Versatz unplausibel.

Die zusätzlich berechneten (hier nicht visualisierten) empirischen Kovarianzfunktionen über die Zeit stellen in zwei Fällen eine über den gesamten Zeitverlauf abfallende Struktur dar. In den anderen beiden Fällen ist die Abnahme des Einflusses über die Zeit (bzw. Wegstrecke unter Berücksichtigung der Schiffsgeschwindigkeit) nur bis zu 300 Sekunden vorhanden. Daher ist auch hier zu plausibilisieren, ob die zeitlich gerichteten Abhängigkeiten nach 300 Sekunden noch vorhanden sind und die oben formulierten Annahmen dazu genauer zu überprüfen sind.

Eine Verbesserung der Datenbasis kann zur Plausibilisierung der Ergebnisse und der Annahmen zum Lag-Effekt und zur Abhängigkeitsstruktur (auch die Aussageweite bezogen auf die Zeitachse) beitragen.



**Bild 1:** Empirisches Variogramm (zeitlichen Korrelation der Zusatzbreiten) der Excelsior am Neckar im Bereich km110,7 bis km113,5 (rechts) bzw. km183 bis km186,3 (links) in Berg-unten) und Talfahrt (oben).

Bei der Verwendung der begrenzten Datenbasis von vier Messfahrten wurde die Abladetiefe konstant angesetzt. Weiterhin wurde die mit dem Programm FahrDyn erzeugten Datensätze für die Auswertung nachbearbeitet, so dass die Daten einem zusätzlichem Informationsverlust unterliegen können.



Zusätzlich kann die Vernachlässigung der geringen Strömungsgeschwindigkeiten und die Annahme einer Geradeausfahrt zu nicht berücksichtigten Einflüssen in den abgebildeten Strukturen führen.

Hierfür sollte eine tiefere Analyse mit Messdaten ohne Strömungseinfluss und in Geradeausfahrt bzw. auf gerader Strecke erfolgen. Eine kleinteilige Filterung und Kategorisierung vorhandener Datensätze (am Rhein und Neckar) ist nach den Erfahrungen der vorliegenden Auswertung für diesen ersten Schritt der Null-Strömung und Geradeausfahrt nicht ausreichend.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2015: Sukzessive Erweiterung der Auswertungen zum Autokorrelationsmodells um den Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit und Kurvenfahrt. Einflussgrößen und Parameterschätzung für die Modellierung des Schiffsführers in Verkehrssimulationsmodellen.

2016: Einbindung ins Verkehrssimulationsverfahren.

Laufzeit des Vorhabens: 2014 bis 2016.

#### **5 Literatur**

Burgers, A., Kok, M. (1989): The statistical analysis of ship manoeuvring simulator results for fairway design based on the interdependency of fairway cross-section transits. Publication no.422. Delft Hydraulics.

ERDC (1982): Channel widths in bends and straight reaches between bends for push towing. Technical Report HL-82-25; Hydraulic Laboratory, U.S. Army Engineer Waterway Experiment Station; Vicksburg, Mississippi, Oktober 1982.

Goovaerts, P. (1997): Geostatistics for Naturel Resources Evaluation; Oxford University Press; New York.

Hattermann, F., Roers, M.: Einführung in die Geostatistik. Skript, PIK Potsdam, <http://www.pik-potsdam.de/~fred/geostatistik/Einf%FChrung%20in%20die%20Geostatistik%204.pdf>; Potsdam.

Läuter, H., Pincus, R. (1989): Mathematisch-statistische Datenanalyse. Akademie-Verlag. Berlin.

Paprocki, M. (2010): Statistische Modellierung und Analyse räumlicher Daten. Diplomarbeit. Universität Potsdam. Potsdam.

Verein für europäische Binnenschifffahrt und Wasserstraßen e.V. VBW (2013): Fahrdynamik von Binnenschiffen: Fahrverhalten auf Binnenwasserstraßen; Hansa-Verlag; Hamburg.

#### **6 Veröffentlichungen**

Söhngen B., Feierfeil T., Paprocki, M. (2014): Semiempirische Untersuchungen zur Mindestbreite der Fahrrinne am Rhein. Duisburg.

Söhngen B. und Paprocki, M. (2013): Mindestbreiten der Fahrrinnen für eine sichere und leichte Schifffahrt. KLIWAS Teilprojekt 4.4. Koblenz.

## Historische Systemzustände des Weser-Ästuars (HIWEST)

**Netzplan-Nr.:** A39550270168  
**Projektleiter:** Dr. Frank Kösters, Wasserbau im Küstenbereich, Ästuarsysteme I  
**Bearbeiterin:** Ulrike Schiller, Wasserbau im Küstenbereich, Ästuarsysteme I  
**E-Mail:** frank.koesters@baw.de

### 1 Problemdarstellung und Ziel

#### 1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Ausbauten und die Errichtung von Strombauwerken im letzten Jahrhundert haben stark in den natürlichen Gewässerverlauf der Unter- und Außenweser eingegriffen. Diese Maßnahmen müssen unter heutigen Gesichtspunkten kritisch betrachtet werden. Dazu sind die hydraulischen Eigenschaften historischer morphologischer Systemzustände des Weser-Ästuars mit aktuellen Methoden zu analysieren und zu bewerten. Notwendige Datengrundlage für diese Untersuchungen sind konsistente digitale Bathymetrien, die aus alten, teilweise noch in analoger Form vorliegenden Vermessungsdaten, aufbereitet werden müssen.

Diese Bathymetrien sind daher ein essentieller Bestandteil beim Aufbau historischer hydrodynamischer morphodynamischer numerischer Modelle. Da zukünftige morphologische Entwicklungen im Ästuar infolge des Klimawandels, neuer Strombaumaßnahmen und der Notwendigkeit effizienter Unterhaltungsstrategien immer mehr in den Fokus wasserbaulicher Fragestellungen rücken, steigen auch die Anforderungen an die Prognosefähigkeit der eingesetzten numerischen Modelle. Verlässliche Aussagen über zukünftige Veränderungen sind jedoch erst dann möglich, wenn durch Hindcast-Simulationen maßgebliche morphologische Tendenzen im Modell qualitativ und quantitativ nachgebildet werden können. Konsistente digitale historische Bathymetrien liefern dazu eine erweiterte Validierungsgrundlage, die eine Ausdehnung des Untersuchungszeitraums erlaubt.

#### 1.2 Bedeutung für die WSV

Die zukünftige morphologische Entwicklung als Folge natürlicher Veränderungen oder anthropogener Eingriffe ist eine der zentralen Fragen im Verkehrswasserbau. Ein im Hinblick auf Ökologie und Ökonomie optimiertes Gewässermanagement basiert immer mehr auf Ergebnissen numerischer Modelle, deren Prognosefähigkeit fortwährend zu verbessern und zu validieren ist.

So ist im Rahmen von wasserbaulichen Maßnahmen wie aktuell die Fahrrinnenanpassung der Weser die WSV in der Situation, nicht nur die aktuelle sondern auch vorangegangene Maßnahmen in ihrer Wirkung bewerten zu müssen. Konsistente digitale Bathymetrien als synoptische Abbilder des Gewässerbetts lassen unmittelbar Rückschlüsse auf morphologische Veränderungen zu, deren hydraulische Auswirkungen mit numerischen Hindcast Simulationen untersucht werden können. Damit liefern die historischen Zustände einen wichtigen Beitrag in der Beurteilung von Einzelmaßnahmen.

#### 1.3 Untersuchungsziel

Dieses FuE-Projekt verfolgt drei wesentliche Untersuchungsziele:

- [UZ1] die Erstellung konsistenter, historischer Bathymetrien,
- [UZ2] die Analyse der morphologischen Änderungen und
- [UZ3] die numerische Simulation hydrodynamischer Zustände für die zurückliegenden Zeitscheiben.

### 2 Untersuchungsmethoden

- Datenrecherche und -akquise in Zusammenarbeit mit WSV und BSH; Aufbau der digitalen Bathymetrien auf Basis der Daten (Vektorisierung des Datenbestandes) als Vergabe
- Analyse der morphologischen Änderungen mit der im Hause verfügbaren Software (Gismo, ArcGis)
- Hydrodynamische Modellierung mit einem numerischen BAW Standardverfahren (UnTRIM oder Delft3D)

### 3 Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurde mit dem ersten Arbeitspaket (WP1, s. Abschnitt 4) begonnen, indem eine umfangreiche Datenrecherche beim BSH, den Wasser- und Schifffahrtsämtern Bremen und Bremerhaven sowie im eigenen Hause erfolgte.

Im Gebiet des Jade-Weser-Ästuars wurden durch das BSH historische TKS aus den Jahren 1949 – 1993 gesichtet und eingescannt. Die Georeferenzierung erfolgte hausintern in der BAW. Von den 45 gelieferten Karten decken jedoch nur die Daten aus den 1970er und 1980er Jahren das Fokusgebiet Außenweser nahezu vollständig ab. Topographische Karten aus den 1950er und 1960er Jahren decken den Bereich des Weser-Fahrwassers nicht oder nur sehr unvollständig ab.

Die umfangreichen Vermessungen Mitte der 1970er Jahre führten zu einer synoptischen KFKI-Küstenkarte der deutschen Küstengewässer der Nordsee, deren Tiefeninformationen bereits von der BAW in früheren Jahren digitalisiert worden ist und somit als existierende digitale Datenquelle für dieses Projekt zur Verfügung steht.

Im Rahmen des KFKI-Verbundprojektes „AufMod“ ist eine digitale bathymetrische Gewässerdatenbank der Deutschen Bucht für die Ableitung raumzeitlicher Topographien erstellt worden. In dieser sind mehrere tausend Datensätze eingegangen. Für das Weser-Ästuar liegen digitale Tiefeninformationen insbesondere aus den 1980er Jahren vor. Inwieweit diese Datensätze eine ausreichende und zuverlässige Quelle für den Aufbau konsistenter Topographien im Ästuarbereich darstellen, ist noch zu prüfen.

Raster-DGMs mit einer Maschenweite von 25x25m stehen aus der Beweissicherung zum SKN-14m – Ausbau für die Unter- und Außenweser ab 1998 zur Verfügung und können für dieses Projekt genutzt werden. Ältere Tiefeninformationen der Unterweser liegen als Querprofile digital und georeferenziert im Abstand von rd. 100m vor. Konsistente Bathymetrien der Unterweser sind dagegen nicht vorhanden.

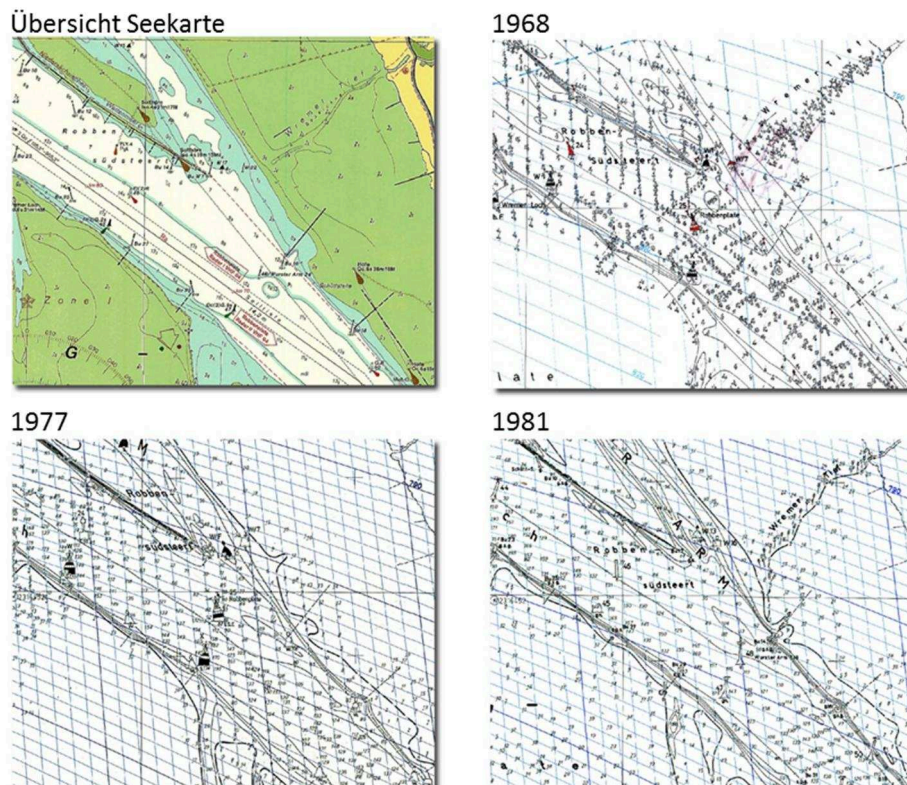


Bild 1: Mündungsbereich des Wurster Arms in das Fedderwarder Fahrwasser auf Basis der topographischen Karte des Seegrundes für unterschiedliche Jahrgänge

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

5/2014 – 6/2015

[WP1] Erstellung konsistenter digitaler Bathymetrien ausgewählter historischer Zustände seit der Verlegung des Fahrwassers in den Fedderwarder Arm (1928). Im ersten Schritt ist die Aufbereitung von 10-jährigen Zeitscheiben vorgesehen (1950, 1960, ..., 2010). Die Ergebnisse topographischer Vermessungen liegen erst ab Mitte der 1990er Jahren vollständig digital vor. Ältere Aufnahmen sind fast ausschließlich in Form analoger Karten verfügbar. Für das hier angestrebte Projekt im Bereich des Weser-Ästuars kann auf topographische Karten des Seegrundes (TKS) des BSHs sowie auf Peilungen der WSÄ Bremen und Bremerhaven, bzw. deren Vorgänger-Organisationen zurückgegriffen werden. Die Aufbereitung beinhaltet die Integration digitaler Bathymetrien für den Bereich der Unterweser, die für einzelne Zeitscheiben bereits vorliegen.

6/2015 – 10/2015

[WP2] Ausschreibung und Vergabe der Vektorisierung des Datenbestandes und der DGM Erstellung

10/2015 – 4/2016

[WP3] Analyse der Bathymetrien aus [WP1] hinsichtlich morphologischer Änderungen sowie deren Bewertung in Bezug auf anthropogene Eingriffe, natürliche Entwicklungstendenzen und sonstige Einflussgrößen. Dies setzt insbesondere die Aufarbeitung von Informationen zu den anthropogenen Eingriffen, z. B. Sandentnahmen für den Bau von Sturmflutsperrwerken, voraus.

5/2016 - 5/2017

[WP4] Hydrodynamische Modellierung der einzelnen Zeitscheiben für vereinfachte Randbedingungen (astronomische Tide, keine Meteorologie). Aufgeteilt in den Vergleich der einzelnen Systemzuständen für einen Satz von vereinfachten Randbedingungen, sowie astronomische Randbedingungen mit repräsentativem Antrieb des jeweiligen Jahres zum Vergleich ausgewählter Tidekennwerte (Tnw, Thw, Thb) mit verfügbaren Beobachtungen.

2014

Laufzeit des Vorhabens: 2014 bis 2017.

#### 5 Literatur

- Herrling, G. und Niemeyer, H. (2008): Harbasins Report: Hydro- and Morphological Pressures and Impacts, 28 S.
- Milbradt, P.; Sellerhoff, F.; Krönert, N. (2005): Abschlussbericht KoDiBa (03KIS042) - Entwicklung und Implementierung von Methoden zur Aufbereitung konsistenter digitaler Bathymetrien
- NLWKN (2010): Historisches Kartenmaterial nach Homeier, Berichte der Forschungsstelle Küste, Band 43/2010, 133 S.
- Van der Wegen, M., Jaffe, B.E., Roelvink, J.A. (2011): Process-based, morphodynamic hindcast of decadal deposition patterns in San Pablo Bay, California, 1856-1887, *Journal of Geophysical Research F: Earth Surface* 116 (2), doi:10.1029/2009JF001614
- Wetzel, V. (1987): Der Ausbau des Weserfahrwassers von 1921 bis heute, In: *Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft*, Band 42, S. 83-105.
- Wienberg, C. (2003): Korrigiert und ausgebagert – Die Außenweser im Wandel der Zeit, In: *Korrigiert und ausgebagert – Die Außenweser im Wandel der Zeit*, Hansesstudien, Band 3, S. 139-160

#### 6 Veröffentlichungen

-/-

**Ereignisgesteuerte Morphodynamik im Weserästuar (MorphoWeser)****Netzplan-Nr.:** A39550270223**Projektleiter:** Dr. Frank Kösters, Wasserbau im Küstenbereich, Ästuarsysteme I (K2)**Bearbeiterin:** Dipl.-Ing. Anna Zorndt, Wasserbau im Küstenbereich, Ästuarsysteme I (K2)**E-Mail:** frank.koesters@baw.de, anna.zorndt@baw.de**1 Problemdarstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die weitläufigen Watten im Gebiet der Außenweser sind morphologisch aktive Bereiche und zeichnen sich durch dynamische Rinnensysteme aus, die durch ein Zusammenspiel verschiedener Randbedingungen beeinflusst werden. Kösters und Winter (2014) untersuchten die Wirkung von Wind-, Wellen und Gezeitenströmungen auf die Morphodynamik der Deutschen Bucht auf Basis von Messungen und numerischen Modellergebnissen. Es zeigt sich, dass tideinduzierte Strömungen die treibende Kraft bei den beobachteten morphologischen Änderungen der Rinnensysteme in den äußeren Ästuaren von Elbe, Weser und Ems, der Jadebucht und den ostfriesischen Seegatten sind. Das Transportverhalten der Sedimente in der Unterweser ebenfalls ist stark tidegetrieben, die Position des ästuarinen Trübungsmaximums wird jedoch vom Oberwasser moderiert. Dies hat einen wichtigen Einfluss auf die Baggermengen, die laut Lange et al. (2012) im Abschnitt Weser-km 55-65 etwa ca. 1-2 Mio. m<sup>3</sup>/Jahr betragen. Die Lage und das Inventar des ästuarinen Trübungsmaximums sind jedoch nicht ausschließlich von der Höhe des Oberwassers beeinflusst, sondern auch von anderen saisonalen und meteorologischen Bedingungen (vgl. Grabemann und Krause 2001), deren komplexe Interaktionen bislang kaum untersucht sind.

Es ergibt sich hieraus, dass sowohl in der Außenweser, als auch in der Unterweser nicht nur der Tideeinfluss, sondern auch energiereiche meteorologische oder hydrologische Einzelereignisse einen Einfluss auf Transportverhalten der Sedimente und die morphologische Entwicklung haben können. Es ergeben sich daraus folgende Fragestellungen, die genauer untersucht werden sollen:

- Stürme: Wie ist die morphologische Reaktion der Rinnensysteme im Bereich der Außenweser auf Sturmereignisse?
- Hochwasser: Welche morphologischen Änderungen ergeben sich aus hohen Oberwasserabflüssen in der Unterweser?

Um morphologische Änderungen besser zu verstehen und zu prognostizieren, werden morphodynamische Modelle unterschiedlicher Komplexität eingesetzt (vgl. Überblick von Syvitski et al. 2010). Inzwischen ist der Einsatz von 2D und 3D numerischen hydro- und morphodynamischen Modellsystemen Standard bei der wasserbaulichen Systemanalyse und wurde erfolgreich in unterschiedlichen regionalen Studien zur Simulation zurückliegender Zeiträume, wie z. B. in Buchten (San Pablo Bay, Kalifornien, van der Wegen et al. 2011), Wattgebieten (Nordfriesland, Junge et al. 2006) und Ästuaren (Schelde, Niederland, Dam et al. 2008) eingesetzt. Die Belastbarkeit der Aussagen wird jedoch heute noch durch die Parametersensitivität der zugrundeliegenden empirischen Beziehungen eingeschränkt (z. B. Lesser et al. 2004). Eine weitere Einschränkung der Modellverfahren ergibt sich aus der häufig verwendeten Annahme, dass die morphologische Änderung einer kurzen Zeitspanne auf eine längere Zeitspanne extrapoliert werden kann („morphologische Beschleunigung“). Insbesondere im Hinblick auf die Wirkung von Einzelereignissen wie Stürmen und Hochwasserabflüssen ist diese Annahme kritisch zu hinterfragen bzw. erfordert besondere Berücksichtigung bei der Modellierung.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Im Hinblick auf die Beratung der WSV durch die BAW ist es notwendig, dem wissenschaftlichen Fortschritt bei der Abbildung des Sedimenttransports Rechnung zu tragen und eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Bearbeitungsmethoden und eingesetzten Modellverfahren sicher zu stellen. Durch eine verbesserte Abbildung morphodynamischer Prozesse kann die Beratungsleistung der BAW im Hinblick auf das Sedimentmanagement weiter erhöht und das Fernziel einer modellbasierten Prognose weiter verfolgt werden.

Zur Optimierung des Sedimentmanagements und zur sicheren Prognose der Wirkung wasserbaulicher Maßnahmen ist es ein umfassendes Verständnis der Sedimentdynamik im Arbeitsgebiet notwendig. Durch langjährige Erfahrung in der Unterhaltung ist bekannt, dass sich die Mindertiefen, in denen Baggermaßnahmen anfallen, in Abhängigkeit des Oberwassers verlagern. Eine Prognose ist derzeit jedoch noch nicht möglich. Greiferproben des WSA Bremerhaven zeigen, dass die Sedimente an der Gewässersohle in der Fahrrinne in den Bereichen des Blexer Bogens und der Schlickstrecke Nordenhams fast ausschließlich aus Schluffen mit variablen aber im Mittel hohen organischen Bestandteilen (>6 % Glühverlust) bestehen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, sowohl den Einfluss von hydrodynamischen und meteorologischen Randbedingungen, als auch die Transportprozesse selbst besser verstehen und abbilden zu können.

### 1.3 Untersuchungsziel

Voraussetzung für die geplanten Analysen ist die Aktualisierung des bisherigen Sedimenttransport- und Morphodynamikmodells der Unter – und Außenweser. Dazu ist neben einer Aufbereitung des aktuellen Stands des Wissens auch die Aufbereitung und Analyse von Messdaten notwendig.

- Ziel 1: Sedimenttransport- und Morphodynamikmodell ist aktualisiert
- Ziel 2: Validierungsdaten sind aufbereitet

Als Hauptuntersuchungsziel erlaubt der Abgleich der Modellergebnisse mit Messdaten eine Abschätzung der Prognosegenauigkeit für Kenngrößen des Sedimenttransports und morphologischer Änderungen. Insbesondere die Effekte meteorologischer und hydrologischer Ereignisse stellen einen weiteren Untersuchungsschwerpunkt dar, deren Wirkung quantifiziert werden soll. Dies schließt eine Evaluation der bisherigen Naturmessungen und mögliche Erweiterungen ein.

- Ziel 3: Modellvalidierung ist abgeschlossen, die Prognosegenauigkeit kann quantifiziert werden
- Ziel 4: Hydrologische und meteorologische Effekte lassen sich im Hinblick auf ihre Wirkung auf Sedimenttransport und Morphodynamik für den Untersuchungsbereich quantifizieren.
- Ziel 5: Anforderungen an zukünftige Messprogramme sind formuliert und pilotartig getestet.

In weitergehenden wissenschaftlichen Untersuchungen ist geplant, die zugrundeliegenden Prozessbeschreibungen (Transportformulierungen nicht-kohäsiver Sedimente und kohäsiver Sedimente) weiter zu entwickeln und so eine Verbesserung der Modellgüte zu erreichen.

- Ziel 6: Bestehende Prozessbeschreibungen sind evaluiert und Optimierungsmöglichkeiten liegen ggf. vor.

## 2 Untersuchungsmethoden

Vorrangig werden die numerischen Verfahren Delft3D und UnTRIM-SediMorph für die zu untersuchenden Fragestellungen eingesetzt. Daneben werden vorhandene Messdaten aufbereitet und analysiert, sowie neue Messkonzepte entwickelt.

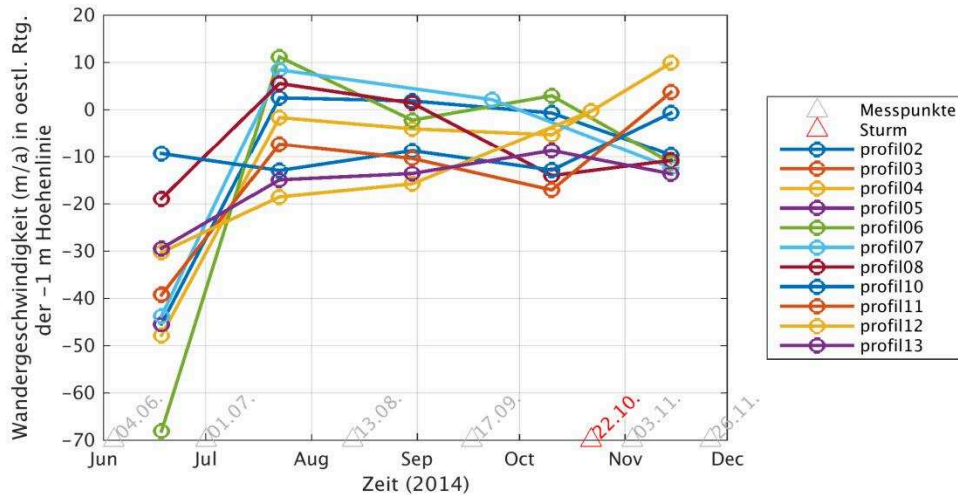
## 3 Ergebnisse

Seit Projektbeginn im August 2014 wurden die Arbeitspakete „Aufbereitung Stand des Wissens“ und „Messdatenaufbereitung und -analyse“ durchgeführt.

In die Messdatenbasis wurden u. a. Messwerte des Wasserstandes, der Strömungsgeschwindigkeiten, Salzgehalte, Temperatur, Trübung integriert. Ergänzend zu diesen als Punktmessungen vorliegenden Daten stehen ADCP Messungen an drei Transekten innerhalb der Trübungszone aus den Jahren 2009 bis 2011 zur Verfügung. Diese wurden jeweils als Ganztidenmessung durchgeführt und können zur Validierung sowohl der Nettosedimenttransporte als auch der Verteilung von Strömungsgeschwindigkeiten und Suspensionskonzentrationen im Querschnitt verwendet werden.

Zur Validierung von morphologischen Prozessen wie Erosions- und Depositionszonen dienen Differenztopographien der Jahre ab 1998. Um kurzfristige morphologische Reaktion der Natur auf z. B. Sturmereignisse untersuchen zu können, wurde der Suezpriel als ein Fokusgebiet ausgesucht. Hier werden monatlich Höhenmessungen auf festgelegten Profilen durchgeführt. In den bisherigen fünf Messungen ist ein Sturmereignis vom 22.10.2014 enthalten, bei dem in Bremerhaven ein Tidehochwasser von +4,04 mNHN festgestellt wurde, welches 2,20 m über dem mittleren Tidehochwasser liegt.

Vorläufige Ergebnisse zeigen, dass in der Messung keine eindeutige Änderung der morphologischen Geschwindigkeit durch das Sturmereignis nachzuweisen ist (siehe Bild 1).



**Bild 1:** Wandergeschwindigkeit in östliche Richtung der -1m Höhenlinie des westlichen Ufers des Suezpriel; berechnet aus den gemessenen Wattkantenprofilen

Die Bearbeitung des Arbeitspaketes „Aufbau Wesermodell (UnTRIM-SediMorph)“ wurde begonnen. Es wurden hierfür Studien durchgeführt, die den Einfluss von Modellparametern auf die Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten, Salzgehalte, Sedimentkonzentrationen sowie die Erosion und Deposition testen. Die Modellergebnisse verschiedener Modellläufe wurden untereinander und mit in der Natur erhobenen Daten verglichen (siehe oben). Es wurden Fortschritte in der Abbildung der tideinduzierten Prozesse wie lokale Resuspension, Advektion mit der Tide und Deposition zu Stauwasser erzielt. Angeschlossen wurden Simulationen von Jahresverläufen. Der Vergleich zwischen Modell und Natur zeigt, dass sich noch weiterer Verbesserungsbedarf in der Abbildung dieser saisonalen Variabilität der Schwebstoffkonzentration mit dem Oberwasser ergibt.

Ebenfalls begonnen wurde das Arbeitspaket „Aufbau Wesermodell (Delft3D)“. Dies wird durch zwei Vergaben an externe universitäre Partner (TU Hamburg-Harburg, Universität Bremen) durchgeführt und von der BAW fachlich eng begleitet.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2015: AP: Aufbau Wesermodell (UnTRIM-SediMorph)  
 AP: Aufbau Wesermodell (Delft3D)  
 AP: Modellkalibrierung und -validierung
- 2016: AP: Hindcast 2012  
 AP: Modelloptimierung
- bis 12/2017: AP Prozessstudien  
 AP Messkonzepte und Pilotmessungen

Laufzeit des Vorhabens: 2014 bis 2017.

#### 5 Literatur

Grabemann, I.; Krause, G. (2001): On Different Time Scales of Suspended Matter Dynamics in the Weser Estuary. In: *Estuaries* 24(5), S. 688-698.

Junge, I.; Wilkens, J.; Hoyme, H.; Mayerle, R. (2006): Modelling of Medium-Scale Morphodynamics in a Tidal Flat Area in the South-Eastern German Bight. In: *Die Küste* (69), S. 279-311.

Kösters, F.; Winter, C. (2014): Exploring German Bight coastal morphodynamics based on modelled bed shear stress. In: *Geo-Mar Lett* 34 (1), S. 21-36. DOI: 10.1007/s00367-013-0346-y.

Lesser, G.R; Roelvink, J.A; van Kester, J.A.T.M; Stelling, G.S (2004): Development and validation of a three-dimensional morphological model. In: *Coastal Engineering* 51 (8-9), S. 883–915. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2004.07.014.

Syvitski, J. P. M.; Slingerland, R. L.; Burgess, P.; Meiburg, E.; Murray, A. B.; Wiberg, P. et al. (2010): Morphodynamic models: An overview. In: C. A. Vionnet (Hg.): River, coastal, and estuarine morphodynamics. RCEM 2009. Boca Raton, London, New York [etc]: Taylor & Francis, S. 3–20.

van der Wegen, M. ; Dastgheib, A. ; Jaffe, B. E.; Roelvink, D. (2011): Bed composition generation for morphodynamic modeling: case study of San Pablo Bay in California, USA. In: *Ocean Dynamics* 61 (2-3), S. 173–186. DOI: 10.1007/s10236-010-0314-2.

## 6 Veröffentlichungen

-/-



## Integration D-Flow

**Netzplan-Nr.:** A39550370221

**Projektleiterin:** Dr.-Ing. Aissa Sehili, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Ästuarsysteme II (K3)

**E-Mail:** aissa.sehili@baw.de

## 1 Problemdarstellung und Ziel

### 1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Das mathematische Verfahren Delft3D wird seit 2005 in der BAW-DH eingesetzt. Mit Delft3D können Hydrodynamik und Transport gelöster sowie suspendierter Substanzen, morphologische Änderungen, Seegang sowie verschiedene Wasserqualitäts-Prozesse simuliert werden. Delft3D wird parallel zu den mathematischen Verfahren UNTRIM und UNTRIM<sup>2</sup> (mit SubGrid) eingesetzt. Die genannten Methoden bilden das Rückgrat praktisch aller für die WSV in Bezug auf Fragestellungen an den Seeschiffahrtsstraßen in der BAW durchgeführten Untersuchungen.

Im Gegensatz zu UnTRIM und UnTRIM<sup>2</sup>, die mit unstrukturierten orthogonalen Gitternetzen genutzt werden, kann Delft3D nur auf strukturierten, krummlinig-orthogonalen Gitternetzen arbeiten. Dies stellt für die geometrisch komplexen Küsten-, Ästuar- und Hafengebiete einen Nachteil dar, da die Erstellung geeigneter Netze nicht immer möglich, oder nur mit sehr großem Aufwand möglich ist.

Seit einigen Jahren arbeitet Deltares (vormals Delft Hydraulics) an einem Nachfolgemodell für Delft3D. Der Arbeitsname ist D-Flow FM. Im Gegensatz zu Delft3D kann D-Flow FM auch auf einem unstrukturierten Gitternetz eingesetzt werden. Des Weiteren wird der Code von D-Flow FM in 2014 für ausgewählte Testuser als Open Source zur Verfügung gestellt. Hierdurch können erforderliche Anpassungen oder Erweiterungen durch Mitarbeiter der BAW und von Dritten, z. B. Universitäten, durchgeführt und der Gemeinschaft der D-Flow FM Anwender zur Verfügung gestellt werden. Es ist zu erwarten, dass D-Flow FM eine weite Verbreitung, intensive Anwendung und rasche Weiterentwicklung erfahren wird.

### 1.2 Bedeutung für die WSV

Der parallele Einsatz unterschiedlicher mathematischer Verfahren (Multi-Modell-Ansatz) für dieselbe Fragestellung, z. B. einer Fahrrinnenanpassung, verbessert die Sicherheit der mit mathematischen Verfahren erstellten Prognosen.

### 1.3 Untersuchungsziel

Das in der BAW-DH eingesetzte mathematische Verfahren Delft3D soll durch D-Flow FM ersetzt werden. Hierbei ist D-Flow FM insbesondere mit den in der BAW-DH standardmäßig genutzten Methoden des Pre- und Postprocessing zu verknüpfen. Einheitlich soll das Dateiformat NetCDF in Kombination mit dem CF Metadatenstandard benutzt werden.

- Erfahrungsaustausch (**WP1**):
  - BAW-intern mit z. B. Fr. R. Patzwahl;
  - Extern mit Mitarbeitern von Deltares, z. B. Hr. F. Platzek.
- Installation der Software, Compilation, Test (**WP2**).
- Vorab-Erprobung „as is“ für die Ästuarie Elbe, Jade-Weser und Ems (**WP3**):
  - Konversion vorhandener Gitternetze;
  - Betrieb mit vereinfachten Randbedingungen;
  - Prüfen der Ergebnisse, Visualisierung.
- D-Flow FM Schnittstellen anpassen an (**WP4**):
  - Import von Anfangswerten aus BAW-Dateien, z. B. CF NetCDF;
  - Import von Randwerten aus BAW-Dateien, z. B. CF NetCDF;

- Ausgabe der Simulationsergebnisse an
  - Einzelpositionen, auf
  - Profilen, im
  - Gesamtgebietin BAW-Dateien, z. B. CF NetCDF.
- Verknüpfung und Erprobung mit Pre- und Postprocessing der BAW (**WP5**):
  - Gitternetzerzeugung / -Konversion mit (Programm JaNET);
  - Analyse der Berechnungsergebnisse (Programm NCANALYSE);
  - Visualisierung der Berechnungsergebnisse (Programme NCPLLOT, DAVIT).
- Funktions-Test für ein Ästuar (Elbe, Jade-Weser oder Ems) (**WP6**):  
Diese Erprobung sollte möglichst parallel zum Einsatz von z. B. UnTRIM in einem laufenden WSV-Projekt erfolgen. Die korrekte und zuverlässige Funktionsfähigkeit von D-Flow in Zusammenspiel mit BAW-Programmen des Pre- und Postprocessings ist zu demonstrieren. Unterschiede in den Ergebnissen von z. B. UnTRIM und D-Flow sind zu dokumentieren und zu bewerten.
- Dokumentation (**WP7**)
  - Examples-Bereich von PROGHOME;
  - BAWiki.
- Information und Schulung potentieller BAW-Anwender (**WP8**).
- Veröffentlichung (**WP9**).  
Insofern interessante Ergebnisse erzielt wurden, sollen diese auf internationalen Tagungen oder (besser) in einem anerkannten internationalen Journal veröffentlicht werden.

## 2 Untersuchungsmethoden

Numerische Modellierung. Programmierung.

## 3 Ergebnisse

- Teilnahme an den "Delft Software Days" 5-6 November 2014. Delft, Niederlande. Gespräche mit den Entwicklern von D-Flow FM. Antragstellung für die Aufnahme als Testuser.
- Installation der „Standalone“ D-Flow FM Version. Durchführung des Schelde Tutorial.
- Installation des Delta Shell GUI 2D3D D-Flow FM Plugin. Erprobung der verschiedenen Funktionalitäten des Systems. Durchführung des Schelde Tutorial.
- Theoretische und konzeptionelle Arbeit.
- Konvertierung eines Elbe-UnTRIM-Gitternetzes in einem knotenbasierten D-Flow FM konformen Gitternetz.
- Durchführung einer reinen hydrodynamischen 2D Simulation der Elbe mit vereinfachten Randbedingungen.

## 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015: **WP3** und **WP4**.

2016: **WP4**, **WP5** und **WP6**.

2017: **WP5**, **WP6**, **WP7** und **WP8**.

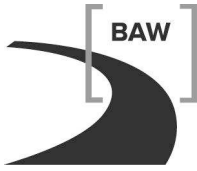
2018: **WP7**, **WP8** und **WP9**.

Laufzeit des Vorhabens: 2014 bis 2018.

## 5 Literatur

Kernkamp HWJ, van Dam A, Stelling GS and de Goede ED (2011): efficient scheme for the shallow water equations on unstructured grids with application to the Continental Shelf. Ocean Dynamics 61(8): 1175–1188.

Kleptsova, O., G. S. Stelling and J. D. Pietrzak (2010): "An accurate momentum advection scheme for z-level coordinate models." Ocean Dyn. 60 (6): 1447–1461.



Kramer SC and Stelling GS (2008): a conservative unstructured scheme for rapidly varied flows. International Journal for Numerical Methods in Fluids 58(2): 183–212.

Donchyts, G. · Baart, F. · Van Dam, A. · De Goede, E. · Icke, J. · Putten, H. (2014): Next Generation Hydro Software. HIC 2014: 11th International Conference on Hydroinformatics, New York, USA, 17-21 August 2014

## **6 Veröffentlichungen**

-/-

**Zukunftskonzept WADABA****Netzplan-Nr.:** A39540070004**Projektleiter/in:** P. Weinmann, Abteilung Zentraler Service**E-Mail:** peter.weinmann@baw.de**1 Problemdarstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Wasserstraßendatenbank (WADABA) stellt ein zentrales IT-Verfahren im Infrastrukturdaten-Management der WSV dar. Technologisch ist die WADABA auf einem Stand von vor ca. 10 Jahren. Die zugrunde liegende Systematik der Objektidentifikation ist 30-40 Jahre alt und repräsentiert die fachliche Sicht (Baubestand). Diese Systematik diente bisher als Regelwerk, stößt bereits jetzt bei baulichen Sonderfällen und bei der Datenorganisation (IT-Sicht) an ihre Grenzen.

Das Verfahren befindet sich an der Bundesanstalt für IT-Dienstleistungen im Wirkbetrieb. Für den technischen Betrieb existiert ein Pflegevertrag, der die Ablauffähigkeit und Sicherheit gewährleistet. Grundlegende technologische und fachlich notwendige Weiterentwicklungen werden in diesem Rahmen unberücksichtigt bleiben.

Erfahrungen aus dem bisherigen Einsatz und sich verändernde Rahmenbedingungen führen zu neuen Anforderungen, welche sich ergeben aus

- den sich verändernden Verwaltungsstrukturen,
- der Notwendigkeit der Berücksichtigung neuer Bauwerkstypen,
- der Notwendigkeit der Bereitstellung von Infrastruktur-Daten an Dritte,
- der Sicherstellung des Datenaustauschs mit anderen bestehenden und zukünftigen IT-Verfahren,
- der Notwendigkeit der Erneuerung und ggf. Standardisierung der Systemlandschaft sowie
- der damit verbundenen Notwendigkeit der Überarbeitung des Betriebskonzeptes.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Die WADABA ist das zentrale Objektkataster der WSV. Die digitale Existenz jedes größeren Infrastruktur-Objektes der WSV beginnt mit der Definition in der WADABA. Der Datenbestand und das bestehende Verfahren WADABA stellen somit die fachliche und datentechnische Grundlage für eine Vielzahl von z.T. geschäftskritischen IT-Verfahren der WSV dar, hier beispielhaft erwähnt seien die Verfahren DVtU für die Vorhaltung des Baubestandswerkes der WSV und das Verfahren zur Bauwerkprüfung WSVPruf. Darüber hinaus bilden Objektinformationen aus WADABA eine Grundlage für weitere fachübergreifende Geschäftsprozesse im Bereich Materialwirtschaft und Planmäßige Unterhaltung sowie Controlling und Anlagenbuchhaltung.

**1.3 Untersuchungsziel**

Ziel ist ein Konzept zur Weiterentwicklung der WADABA. Um die Anforderungen an das zukünftige System exakt definieren zu können, muss der bestehende Bedarf beschrieben werden. WADABA ist zusammen mit den umgebenden Systemen anwendungsbezogen gewachsen. Eine geschlossene Darstellung des aktuellen Systemzustandes und des tatsächlichen Nutzungsprofils der WADABA liegt nicht vor, wird aber als notwendige Grundlage für die Ableitung von Entwicklungsperspektiven gesehen.

Begleitender Leitgedanke einer grundlegenden [technischen] Weiterentwicklung ist, dass die WADABA kein umfassendes, geschlossenes System zur Pflege und Recherche aller Objektdaten mehr sein sollte, sondern klar trennen muss zwischen

- technischer Datenverwaltung (Datenbankschicht),
- Katalog- und Stammdatenverwaltung,
- Fachschalen zur Pflege fachbereichsspezifischer Objektarten,
- Reporting und
- Schnittstellen.

## 2 Untersuchungsmethoden

Ausgehend von der aktuellen Systemarchitektur und dem Betriebskonzept erfolgt zunächst die Systemanalyse. Die zentrale Komponente stellt dabei die WADABA dar. Gemäß den ursprünglichen Entwicklungszielen sollte WADADA das so genannte führende System darstellen, welche die eindeutige Existenz von Infrastruktur-Informationen sicherstellt und wichtige Eigenschaften als Auskunftssystem vorhält. Direkt abhängige [Teil-]Systeme sind derzeit Korrosionsschutz-Datenbank, Bühnen-GIS, WSVPruf und DVtU. Im Zuge der Recherchen lässt sich der Untersuchungsgegenstand auf die Verfahren DBWK/IENC (Digitale Bundeswasserstraßenkarte / Inland Electronic Navigational Chart), GDI-WSV (Geodateninfrastruktur der WSV), ELWIS (Elektronischer Wasserstraßen-Informationsservice) sowie Verfahren im SAP-Umfeld erweitern. Das im Ergebnis erwartete Prozessmodell wird über tatsächliche Informationsflüsse von WADABA-Objektinformationen informieren.

Aktuelle Trends in der Systementwicklung (SOA - serviceorientierte Architekturen), übergeordnete Regularien (z.B. INSPIRE) und verfügbare Entwicklungsergebnisse aus anderen Projekten (z.B. IDMVU – Infrastruktur-Daten-Management der Verkehrsunternehmen) werden berücksichtigt.

## 3 Ergebnisse

In der ersten Phase August bis Dezember 2014 erfolgten die Einarbeitung, die Systemanalyse und die Kontaktaufnahme mit den Nutzergruppen. Der erste Zwischenbericht wird das zugrunde liegende Datenmodell, Hinweise zum „Mengengerüst“ des Datenbestandes, die Darstellung des bisherigen Entwicklungs- und die Betriebshistorie beinhalten.

In einem externen Forschungsprojekt wurde mit Unterstützung des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur das Infrastruktur-Daten-Management von Verkehrsunternehmen (IDMVU) detailliert untersucht und ein Datenmodell beschrieben. Es wird erwartet, dass Ergebnisse dieses Forschungsprojektes für die Beschreibung eines Konzeptes der WSVweiten Infrastrukturdaten-Managements (Zielfunktion) herangezogen werden können. Daher erfolgte die Kontaktaufnahme mit der DB Netz AG, mit dem Ziel des Erfahrungsaustauschs zum Praxiseinsatz der IDMVU-Schnittstelle.

## 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Laufzeit des Vorhabens: 2014 bis 2017.

2015:

- Systemanalyse (Ist-Zustand): Architektur, Datenkatalog[e], Geschäftsprozesse, Schnittstellen, Ermittlung der Datenqualität
- Kontaktaufnahme mit Nutzergruppen (Verfahrensbetreuer WADABA, Projektgruppe Erhaltungsmanagement, BMVI)

2016-2017:

- Dokumentation der Ergebnisse,
- Anforderungsanalyse,
- Entwurf eines funktionalen und technischen Systemkonzepts

## 5 Literatur

-/-

## 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Datenmanagement und Qualitätssicherung im Verkehrswasserbau**

**Netzplan-Nr.:** A39540700005

**Projektleiter/in:** Thomas Damrau, Abteilung Zentraler Service, IT-Support (Z3)

**Bearbeiter:** Christoph Wosniok, Dienststelle Hamburg, Geschäftsstelle KFKI  
Katja Perras, Zentraler Service, Verwaltung (Z1)

**E-Mail:** thomas.damrau@baw.de, christoph.wosniok@baw.de, katja.perras@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die BAW nutzt vielfältige selbst erzeugte Daten zur Erfüllung Ihrer speziellen fachlichen Aufgaben. Aufgrund der in den vergangenen Jahren rasant angestiegenen Datenmengen, der immer höheren Komplexität der hierfür vorzuhaltenden technischen Plattformen und der gerade aktuellen politischen und rechtlichen Veränderungen ist der Umgang und die Bereitstellung von Daten für die BAW neu zu definieren. Um den wissenschaftlichen Anspruch als technisch-wissenschaftliche Oberbehörde und Ressortforschungseinrichtung zu entsprechen ist es geboten ein abteilungsübergreifendes fachliches, organisatorisches und rechtliches Konzept für das Management und die Verwendung von Fachdaten zu entwickeln. Aufgrund der hohen Komplexität wird das Vorhaben in zwei Teilprojekte gegliedert.

##### **Teilprojekt 1 – Management von Fachdaten**

Es soll ein Konzept für die Optimierung des Simulationsdatenmanagements in der BAW aufgestellt und umgesetzt werden. In den Abteilungen Wasserbau im Binnenbereich (W) und Wasserbau im Küstenbereich (K) bilden vor allem Simulationen mittels numerischer und physikalischer Modelle die zentralen Methoden zur Bearbeitung der zunehmend komplexeren und stetig veränderlichen Projektaufgaben. Der Umgang mit den Modell- und Simulationsdaten und deren Dokumentation ist bislang sehr individuell gestaltet und dem einzelnen Bearbeiter überlassen. Vor dem Hintergrund des stetig anwachsenden Datenvolumens ist diese Vorgehensweise nicht mehr angemessen denn sie hat zunehmend gravierende Folgen wie eingeschränkte Wiederauffindbarkeit von Daten, erheblicher Aufwand für die Datenbeschaffung und -aufbereitung oder Kosten durch Speicherung und Sicherung unnötiger bzw. redundanter Daten.

##### **Teilprojekt 2 – Verwendungs- und Zugangskonzept**

Die BAW bietet bereits heute ein breites Portfolio an frei verfügbaren Daten und Informationen für die WSV, das BMVI, die Fachöffentlichkeit und die Allgemeinheit. Den politischen und rechtlichen Forderungen nach frei verfügbaren öffentlich finanzierten Daten und Informationen kommt die BAW als technisch-wissenschaftlicher Berater sowie als Ressortforschungsbehörde in vielen Bereichen bereits heute nach. Die Vielzahl an Aktivitäten stellt das hohe fachliche Potenzial der BAW als Wissensträger für den Verkehrswasserbau auf nationaler und internationaler Ebene dar. Dieses positive Heraushebungsmerkmal macht gleichzeitig die Herausforderung des Teilprojekts 2 deutlich: Ein fehlendes und einheitliches Rechte- und Verwendungskonzept der Fach- und Publikationsdaten der BAW. Die aktuelle Bereitstellung von frei verfügbaren Daten und Informationen für die jeweiligen Zielgruppen findet ohne rechtliches, organisatorisches und abteilungsübergreifendes Konzept statt. Die jeweiligen Aktivitäten führen ein „Eigenleben“ und sind für die Behörde BAW in sich nicht konsistent. Dem wissenschaftlichen Berater und Gutachter BAW fehlt es derzeit an einer rechtlich gesicherten Konzeption für die Verwendung und Bereitstellung des eigenen Wissens. Eine Positionierung der Haushaltung zur Erarbeitung einer Gesamtstrategie für einen professionellen Umgang mit Open-Data und Open-Access ist dabei unabdingbar.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Einführung von Richtlinien und Systemen zum Management von Fachdaten und Publikationen führt in der BAW zu einer deutlichen Effizienzsteigerung in der Projektbearbeitung, schafft Transparenz und ermöglicht über die Festlegung von Standards die Sicherung und Kontrollierbarkeit der erreichbaren Qualität. Gleichzeitig schaffen die Maßnahmen die Basis für eine qualitätsgesicherte Weitergabe der Fachdaten der BAW an die WSV bzw. an Dritte. Dieses fachliche strukturierte und rechtlich gesicherte Vorgehen schafft eine wesentliche Grundlage zur Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen.

Die Entwicklung und Einführung eines bedarfsorientierten und optimierten Workflow zur Datenbereitstellung vergrößert das Verständnis der Nutzer für die Daten und sorgt gleichzeitig für eine interne und externe Qualitätssicherung der Daten.

Die fachliche und gesellschaftliche Wertschöpfung von BAW-Produkten wird durch die Veröffentlichung von Fachdaten und Publikationen gesteigert. Die Fachöffentlichkeit kann so explizit angesprochen werden. Das breite Leistungsportfolio der BAW als wissenschaftliche Behörde wird noch deutlicher bekannt gemacht.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Es soll ein einheitliches Datenmanagement für Fachdaten eingeführt werden, welches ein Metadatenmanagement einschließt. Damit wird das Ziel einer langfristigen und effizienten Datenhaltung und -bereitstellung für verschiedene Zwecke und Zielgruppen (z.B. via Geoportal.de oder govdata.de) gleichzeitig gewährleistet. Die Bereitstellung von standardisierten und qualitätsgesicherten Systemen zur Recherche, Bearbeitung, Dokumentation, Analyse und Visualisierung steht dabei im Vordergrund. Letztendlich soll das Vorhaben als ein Baustein für ein umfassendes Projektmanagementsystem für die Bearbeitung verkehrswasserbaulicher Projekte durch die BAW dienen.

Es soll eine einheitliche auf dem Open-Access Prinzip basierende Strategie für den Zugang zu Fachdaten und Publikationen entwickelt werden, welche die besonderen Belange der BAW sowohl als gutachterlicher Berater der WSV, wie auch als Ressortforschungseinrichtung berücksichtigen.

Auf Basis der erzielten organisatorischen, rechtlichen und technischen Ergebnissen des Vorhabens wird die Voraussetzung für ein einheitliches Management der relevanten Fachdaten geschaffen. Simulationsdaten bilden dabei einen wesentlichen Teil des gesamten Fachdatenbestands der BAW. Aufgrund der hohen technischen Komplexität fokussiert das Teilprojekt 1 auf diesen Datenbereich. Im Teilprojekt 2 wird neben den Fachdaten auch das Optimierungspotenzial bei der Bereitstellung von Publikationen der BAW betrachtet.

## **2 Untersuchungsmethoden**

### **Teilprojekt 1**

Die Untersuchungen für dieses Vorhaben berücksichtigen die aktuell bestehenden Systeme und Richtlinien zum Datenmanagement der Abteilungen W und K, insbesondere im Hinblick auf eine Integration von Recherche, Auswertung und Präsentation von Daten und Ergebnissen. Für deren Erfassung wird zuerst eine umfangreiche Analyse der Ist-Situation durchgeführt. Hieraus resultiert ein Soll-Konzept für ein einheitliches Management der relevanten Fachdaten mit Vorschlägen für die Durchführung organisatorischer Maßnahmen und die Bereitstellung von IT-Systemen. Anhand von exemplarischen Projekten zur Umsetzung dieser Vorschläge in den Abteilungen W und K soll die Validität des Soll-Konzeptes überprüft werden.

### **Teilprojekt 2**

Ermittlung und Aufbereitung der rechtlichen Anforderungen für eine offene Datenbereitstellung auf Basis der aktuellen supranationalen und nationalen Rechtslage unter gleichzeitiger Berücksichtigung der gegenwertigen politischen Entwicklung und Förderung der Themenbereiche Open-Data und Open-Access. Als Ergebnis dieser Untersuchung wird im ersten Schritt eine Open-Data und Open-Access-Policy erarbeitet, welche anschließend durch die Leitung der BAW eingeführt wird. Die verbindliche Festlegung dieser Richtlinie durch die Hausleitung stellt im Teilprojekt 1 den ersten entscheidenden Meilenstein für die Akzeptanz und Transparenz dieses Vorhabens innerhalb der BAW dar.

Auf dieser Basis wird ein umfassendes Rechtskonzept für die Bereitstellung und öffentliche Verwendung von Fachdaten und Publikationen der BAW entworfen. Nach der Fertigstellung des Soll-Konzeptes im Teilprojekt 1, inklusive der Festlegung eines verbindlichen Metadaten-systems für die Simulationsdaten, erfolgt eine bedarfsgerechte Anpassung des Rechte- und Verwendungskonzeptes zur weiteren Umsetzung innerhalb der BAW.

Im Anschluss an die Konzeptionsphase und die Zusammenführung der Ergebnisse aus den beiden Teilprojekten steht die Umsetzung der für die langfristige Sicherstellung dieser Ergebnisse notwendigen organisatorischen und technischen Maßnahmen im Vordergrund.

### 3 Ergebnisse

#### Teilprojekt 1

Die Erhebung des Ist-Stands wurde begonnen. Dazu wurden in den Referaten der Abteilungen W und K im Zusammenhang mit dem Datenmanagement eingesetzte Verfahren und Vorgehensweisen erfasst. Im Rahmen der Erhebung wurde deutlich, dass die Realisierung einer einheitlichen Projektmanagementumgebung eine Randbedingung für die erfolgreiche Optimierung des Datenmanagements sein könnte. Diese möglicherweise bestehende Abhängigkeit soll während der weiteren Bearbeitung des Vorhabens noch überprüft werden.

#### Teilprojekt 2

Die Erhebung des Ist-Stands der BAW zur Bereitstellung von Fachpublikationen für den internen sowie für den externen Gebrauch wurde durchgeführt. Im Fokus der Erhebung lag die Darstellung und Beschreibung der vorhandenen Arbeits- und Bereitstellungsprozesse in Bezug auf Fachpublikationen der BAW. Auf Basis der Ergebnisse der Ist-Analyse wurde ein erster Entwurf für die Konzeptionierung und Umsetzung des Open-Access-Prozesses in der BAW entwickelt. Hierbei lagen insbesondere rechtliche und organisatorische Anforderungen im Fokus.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015: Erarbeitung eines Soll-Konzeptes für das Fachdatenmanagement mit dem Fokus auf Simulationsdaten.

Auswahl repräsentativer Aufträge aus den Abteilungen W und K zur konkreten Untersuchung hinsichtlich des Datenmanagements.

Festlegung der relevanten Simulations- und Projektdaten sowie der abgeleiteten Datenprodukte, die in einem entsprechenden Datenmanagementsystem vorgehalten werden sollen.

Festlegung von im Rahmen des Vorhabens umzusetzenden Maßnahmen zur Optimierung des Simulationsdatenmanagements.

Einführung einer verbindlichen Open-Data und Open-Access Policy für die BAW.

Erstellung eines Rechte- und Verwendungskonzepts von Fachdaten anhand der gesetzlichen Vorgaben.

2016: Festlegung eines verbindlichen Metadatenstandards für Simulationsdaten und Bereitstellung einer Softwarelösung zur möglichst automatisierten Erzeugung der Metadaten während des Projekt-Workflows.

Einführung eines Managementsystems zur Verwaltung und Versionierung der Simulationsdaten sowie der Metadaten, im Kontext zum organisatorischen und rechtlich ausgerichteten Projektmanagement. Die Verknüpfung der Simulationsdaten mit anderen Informationsquellen soll mit diesem System ebenfalls realisiert werden.

2017: Anpassung des Simulations-Workflows (u.a. Umsetzung standardisierter Datenformate).

Untersuchung der Anforderungen an eine geeignete IT-Infrastruktur.

Vorbereitung einer verbindlichen Einführung der technischen Systeme in der BAW.

Einführung eines fachwissenschaftlichen Repositories zur standardisierten und qualitätsgesicherten offenen Bereitstellung wissenschaftlicher Fachpublikationen.

Laufzeit des Vorhabens: 2014 bis 2017.

### 5 Literatur

Perras, P. (2014): Wissenschaft trifft Open Access: Ein Spannungsverhältnis im Urheberrecht, Masterarbeit, Hochschule für öffentliche Verwaltung Kehl, 2014.

### 6 Veröffentlichungen

-/-