

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Periodical Part, Published Version

**Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.)**

**Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2009**

BAWForschungskompodium

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101761>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

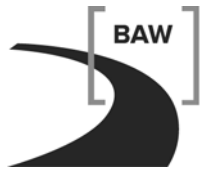
Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2009): Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2009. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAWForschungskompodium).

**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.





**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen



## **Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2009**



## Vorwort

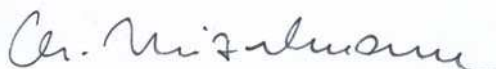
Mit rund 70 aktiven Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (FuE-Vorhaben) im Jahr 2009 hat die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) als technisch-wissenschaftliche Bundesoberbehörde dazu beigetragen, Wissenslücken im Verkehrswasserbau zu schließen und dabei praxisnahe, zukunftsweisende, kostengünstige und sichere Lösungen zu entwickeln.

Die verkehrswasserbauliche Forschung der BAW wird auf den Gebieten der Bautechnik, der Geotechnik, des Wasserbaus im Binnen- und Küstenbereich sowie der Informationstechnik wahrgenommen. Daneben gliedert sich die Forschung der BAW 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“ aus dem Jahr 2008. 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, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) 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 bearbeiten. Diese Verzahnung trägt zur besonderen fachwissenschaftlichen Kompetenz der BAW bei und gewährleistet die schnelle Nutzung neuer Erkenntnisse.

Die BAW bedient sich bei der Bearbeitung der FuE-Vorhaben der neuesten wissenschaftlichen und technischen Methoden. Für Zuarbeiten und Kooperation mit Hochschulen, Fachinstituten und Ingenieurbüros auf nationaler und internationaler Ebene standen im Jahr 2009 planmäßig rund € 700.000 zur Verfügung, ergänzt um außerplanmäßige ca. € 800.000 aus Sonder- und Konjunkturprogrammen des Bundes. Zur mittelfristigen Ausrichtung ihrer verkehrswasserbaulichen Forschung hat die BAW im letzten Jahr das „Forschungsprogramm Verkehrswasserbau der Bundesanstalt für Wasserbau“ (siehe auch [www.baw.de](http://www.baw.de)) erarbeitet.

Das vorliegende Forschungskompodium 2009 gibt einen vollständigen Überblick über die abgeschlossenen, laufenden und neu begonnenen Forschungsaktivitäten der BAW, dargestellt in Form von Kurzberichten.



Prof. Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann  
Direktor und Professor  
der Bundesanstalt für Wasserbau



Dipl.-Ing. Claus Kunz  
Forschungskoodinator der BAW



## Inhaltsverzeichnis

### I. Abgeschlossene FuE-Vorhaben in 2009

| Bezeichnung  | Auftragsnummer | Abteilung | Forschungsbereich <sup>1)</sup> | Seite |
|--|----------------|-----------|---------------------------------|-------|
| Bauwerksmessungen an der Kanalbrücke Magdeburg   | A39510110038   | B         | S                               | 002   |
| Bewertung der Korrosion von Spundwänden  | A39510210108   | B         | N                               | 005   |
| Klassifizierung stahlwasserbautypischer Kerbdetails  | A39510210163   | B         | S                               | 009   |
| Vergleichende Untersuchungen zu Bohrmethoden   | A39520110028   | G         | I                               | 013   |
| Grundwasser- und Wärmetransportmodelle   | A39520305733   | G         | I                               | 017   |
| Infiltrationsdynamik in Erdbauwerken   | A39520310047   | G         | N                               | 019   |
| Verzerrte aerodynamische Modelle   | A39530210078   | W         | I                               | 021   |
| Modellierung der Wechselwirkung von strömendem Fluid und darin bewegten Körpern                      | A39530310112   | W         | I                               | 024   |
| Nautische Sohle im Schlick   | A39550110128   | K         | M                               | 027   |
| Windstaudstudien und Entwicklung eines operationellen Tideelbe-Modells (OPTTEL) Teilprojekt OPTTEL-C | A39550370134   | K         | I                               | 030   |

### II. Laufende FuE-Vorhaben in 2009

| Bezeichnung  | Auftragsnummer | Abteilung | Forschungsbereich <sup>1)</sup> | Seite |
|--|----------------|-----------|---------------------------------|-------|
| Rissbreitenbegrenzende Bewehrung für massige Betonbauteile   | A39510110124   | B         | S                               | 034   |
| Entwicklung eines Erhaltungsmanagementsystems für die WSV (EMS-WSV) auf der Basis der Ergebnisse der Bauwerksprüfung | A39510010139   | B         | S                               | 037   |
| Ermittlung Kräfte bei Ankerwurf  | A39510110178   | B         | S                               | 040   |
| Ermüdungsfestigkeitsversuche an geschmiedeten Hängeranschlüssen von Stabbogenbrücken                                 | A39510110194   | B         | S                               | 043   |
| Empfehlungen zum Pollerzug (Trossenzugansatz) für Binnenschiffsschleusen   | A39510210106   | B         | S                               | 045   |
| Modellversuche zum Einsatz von Gleitpaarungen im Stahlwasserbau  | A39510210239   | B         | N                               | 049   |
| Korrosionsschutz mit Blatt 87 - Untersuchungen zu Zwischenhaftungs- und Farbproblemen                                | A39510210309   | B         | I                               | 052   |
| Machbarkeitsstudie zum Einsatz von Schleusentoren aus Faserverbundwerkstoffen  | A39510270001   | B         | I                               | 056   |
| Frostwiderstand zementgebundener Baustoffe   | A39510308099   | B         | N                               | 059   |

| Bezeichnung  | Auftragsnummer | Abteilung | Forschungsbereich <sup>1)</sup> | Seite |
|--|----------------|-----------|---------------------------------|-------|
| Instandsetzungssysteme für alte Wasserbauwerke   | A39510310127   | B         | N                               | 063   |
| Einfluss von Schalung und Nachbehandlung auf die Dauerhaftigkeit geschalter Betonoberflächen                             | A39510310141   | B         | N                               | 066   |
| Adiabatische Wärmemessungen an ausgewählten Betonrezepturen  | A39510310177   | B         | N                               | 070   |
| Chloreindringwiderstand von Beton  | A39510310231   | B         | N                               | 071   |
| Injektion von Hohlräumen hinter einer Vorsatzschale  | A39510310234   | B         | I                               | 074   |
| Textilbewehrte Vorsatzschalen zur Instandsetzung von Betonbauteilen  | A39510310238   | B         | I                               | 076   |
| Dauerhaftigkeitsbemessung von Wasserbauwerken  | A39510310240   | B         | N                               | 079   |
| Ausbildung von Arbeitsfugen  | A39510310313   | B         | INN                             | 082   |
| Überarbeitung des Turbulenzprüfverfahrens für Geokunststoffe   | A39510370001   | B         | N                               | 085   |
| Untersuchung zum Einsatz von Mikrohohlkugeln in Beton als Alternative zum Luftporenbeton                                 | A39510370002   | B         | I                               | 088   |
| Betone für massige Bauteile von Wasserbauwerken  | A39510370003   | B         | I                               | 091   |
| Messverfahren Hydratationswärme  | A39510370004   | B         | N                               | 094   |
| Verwendung von Acylatgelen und gelartigen Produkten für Instandsetzungsmaßnahmen an Massivbauwerken im Verkehrswasserbau | A39510370005   | B         | I                               | 096   |
| Ertüchtigung der Bewegungsfugen von Massivbauwerken im Verkehrswasserbau   | A39510370006   | B         | N                               | 099   |
| FuE Hydroabrasion  | A39510370008   | B         | N                               | 102   |
| Anwendung des Flat-Dilatometers zur Ermittlung von Bodenparametern in-situ   | A39520105581   | G         | I                               | 105   |
| Konzept einer Datenbank für Ergebnisse boden- und felsmechanischer Laborversuche   | A39520110069   | G         | INN                             | 110   |
| Parameter für Stoffgesetze bei FE-Berechnungen   | A39520205613   | G         | I                               | 114   |
| Bruch- und Verformungsverhalten von rutschgefährdeten Böschungen unter Berücksichtigung des Dreiphasensystems            | A39520210001   | G         | S                               | 117   |
| Böden unter Stoßbelastung  | A39520210014   | G         | S                               | 120   |
| Modellierung der Verformung nichtbindiger Böden unter zyklischer Belastungseinwirkung von Schleusenbauwerken             | A39520210045   | G         | N                               | 124   |
| Numerische Modellierung von Bruchvorgängen in Böden  | A39520210084   | G         | I                               | 127   |

| <b>Bezeichnung</b>   | <b>Auftragsnummer</b> | <b>Abteilung</b> | <b>Forschungs-<br/>bereich <sup>1)</sup></b> | <b>Seite</b> |
|--|-----------------------|------------------|--|--------------|
| Hydraulischer Grundbruch in bindigem Boden   | A39520305730          | G                | S  | 130          |
| Bestandsaufnahme vorhandener Deckwerke in den Wasserstraßen der WSV  | A39520410006          | G                | N  | 134          |
| Bemessung von geotechnischen Filtern unter instationärer Belastung   | A39520410076          | G                | N  | 136          |
| Alternative technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen – Quantifizierung ihrer Belastbarkeit und Möglichkeiten ihrer Anwendung an Binnenwasserstraßen | A39520410151          | G                | N  | 138          |
| Ausbildung von Dichtungsanschlüssen im Streckenbereich von Wasserstraßen   | A39520410217          | G                | S  | 142          |
| Einfluss der Vorlandvegetation auf den Hochwasserabfluss und die Sohlstabilität in Bundeswasserstraßen   | A39530110036          | W                | N  | 145          |
| Untersuchung der Prognosefähigkeit von mehrdimensionalen Feststofftransportmodellen an spezifischen Fragestellungen aus dem Flussbau                     | A39530110064          | W                | I  | 147          |
| KLIWAS-Projekt 4.03: Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes                          | A39530170001          | W                | M  | 151          |
| Hydraulische Wirkung von Stromregelungsbauwerken   | A39530210077          | W                | N  | 156          |
| Optimierungsverfahren für die Parametrisierung von Reglern der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR)                                       | A39530310105          | W                | M  | 160          |
| Bemessung und Konstruktion von Schlauchwehren  | A39530370001          | W                | I  | 164          |
| Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen  | A39530410035          | W                | M  | 168          |
| Wartezeiten vor Engstellen   | A39530410036          | W                | M  | 171          |
| Mindestabstände Schiff-Sohle zur Vermeidung von Steinschlägen  | A39530410037          | W                | S  | 173          |
| Einwirkung des Propellerstrahls auf die Gewässersohle  | A39530410038          | W                | N  | 175          |
| Ermittlung notwendiger Fahrrinnenbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt  | A39530470001          | W                | M  | 180          |
| Konsolidationsverhalten von Baggergut (Schlick)  | A39550110100          | K                | N  | 183          |
| Bemessung korrodierter Stahlpundwände im Wasserbau   | A39550110158          | K                | N  | 187          |
| Deckwerksanalyse mit der Distinkt Element Method (DEM)   | A39550170270          | K                | I  | 191          |
| Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiff-fahrtsstraße - Schiffsdynamik   | A39550210055          | K                | N  | 195          |

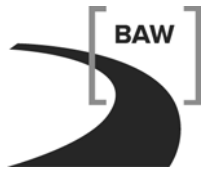


| Bezeichnung   | Auftragsnummer | Abteilung | Forschungsbereich <sup>1)</sup> | Seite |
|---|----------------|-----------|---------------------------------|-------|
| MudSim: Numerische Simulation der Dynamik von Flussschlamm (MudSim-B)                 | A39550210093   | K         | N                               | 199   |
| SensorWeb-WSV - Aufbau eines Sensorweb-Rahmenwerks für unterschiedliche Messparameter | A39560270001   | DLZ-IT    | I                               | 203   |
| Setzungen von Sanden bei Schwingungsanregung  | A39560610016   | G         | S                               | 207   |
| Statistische Auswertung von Erschütterungsemissionen                                  | A39560610020   | G         | S                               | 210   |

### III. Neue FuE-Vorhaben in 2009

| Bezeichnung   | Auftragsnummer | Abteilung | Forschungsbereich <sup>1)</sup> | Seite |
|---|----------------|-----------|---------------------------------|-------|
| Mauerwerk im konstruktiven Wasserbau  | A39510370007   | B         | I                               | 214   |
| Hydraulischer Grundbruch bei unterströmten Bauwerken mit luftseitigen Auflastfilter   | A39520370001   | G         | S                               | 216   |
| Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht - AufMod -  | A39550270116   | K         | I                               | 218   |
| KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt<br>Projekt 2.04: Betroffenheit wasserbaulicher Anlagen der deutschen Küste und der Ästuare durch Klimaänderungen; Projekt 3.02: Anpassungsoptionen für Wasserstraßen und Häfen an der deutschen Küste sowie für den Küstenschutz bei Extremereignissen | A39550310162   | K         | M                               | 221   |
| UnTRIM SubGrid-Topografie   | A39550370150   | K         | I                               | 225   |
| KLIMZUG-Nord – Strategische Anpassungsansätze zum Klimawandel in der Metropolregion Hamburg   | A39550370163   | K         | N                               | 228   |
| XtremRisk: Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten -- Risikoermittlung und -beherrschung im Klimawandel  | A39550370165   | K         | N                               | 232   |

- 1) I: Innovative Technologien  
M: Mobilität  
S: Sicherheit und Schutz  
N: Nachhaltigkeit  
INN: Innovationsprogramm Bundeswasserstraßen



## **I Abgeschlossene FuE-Vorhaben in 2009**

## **Bauwerksmessungen an der Kanalbrücke Magdeburg**

**Netzplan-Nr.:** A39510110038

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

**E-Mail:** rainer.ehmann@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

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

Die neu erbaute Kanalbrücke Magdeburg ist eines der bedeutendsten Ingenieurbauwerke der WSV. Das Bauwerk besteht aus einer 3-feldrigen Strombrücke mit 228 m Länge und der 16-feldrigen Vorlandbrücke mit einer Gesamtlänge von 690 m. Wegen der Komplexität der Konstruktion und der Randbedingungen (z. B. starke Setzungen) mussten während der Planung und Ausführung innovative und noch nicht erprobte technische Lösungen entwickelt werden, die teilweise einer Zustimmung im Einzelfall bedurften. Die Vorstellung des WNA Magdeburg war daher nahe liegend, die Herstellung und den späteren Betrieb durch ein qualitätssicherndes und überwachendes Messprogramm zu begleiten.

Monitoringsysteme sind teilweise bei Straßen- und Eisenbahnbrücken im Einsatz, bei Kanalbrücken noch nicht und stellen daher ein Novum dar, so dass Erkenntnisse über das langjährige Betriebsverhalten dieses Brückentyps erwartet werden. Hinzu kommt, dass erstmals bei Kalottenlager eine Sensortechnik zur Kraftmessung installiert wurde.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Nur die WSV baut und unterhält Kanalbrücken. Vertiefte Kenntnisse über das Betriebsverhalten, rechtzeitiges Erkennen von Veränderungen sowie die Auswertung von Erfahrungen sind von grundlegendem Interesse.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Mit den Bauwerksmessungen soll sowohl die Herstellung, insbesondere die richtige Einlagerung, als auch der spätere Betrieb durch ein qualitätssicherndes und überwachendes Messprogramm begleitet werden. Aufbauend auf dem installierten Messsystem soll ein Monitoringsystem für das zuständige WSA entwickelt werden, das eine ständige Überwachung der Funktionsfähigkeit der Kanalbrücke mit minimalem personellen Aufwand ermöglicht. Ebenfalls wird die regelmäßige Bauwerksprüfung unterstützt und in ihrem Aufwand reduziert. Daneben werden wissenschaftliche Erkenntnisse über das langjährige Betriebsverhalten, z.B. Zusammenhänge zwischen aufsummierter Lagerwege und Lagerverschleiß erwartet.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Es wurden folgende Messungen während der Herstellung bis zur Flutung der Brücke durchgeführt:

- Extensometermessungen an den Strompfeilern (BAW)
- Dehnungsmessungen an der Strombrücke (Prof. Hering)
- Temperaturmessungen an der Strom- und Vorlandbrücke (BAW)
- Lagerkraftmessungen an allen 93 Kalottenlagern mit Kippspaltmessungen (WNA)
- Wasserdruckmessungen (BAW)
- Geodätische Messungen.

Die während der Bauphase separat betriebenen Messsysteme sind bis auf die Dehnungsmessungen, die inzwischen stillgelegt wurden, hinsichtlich der Messwerterfassung und Speicherung auf einem zentralen Rechner im Bauwerk zusammengeführt worden.

Der erste Teil des FuE-Vorhabens umfasst die wissenschaftliche Aufbereitung und Interpretation der Messungen, beginnend von der Herstellung des Bauwerkes bis zur Inbetriebnahme im Oktober 2003.

Mit Ausnahme der Dehnungsmessungen wurde hierzu das Ingenieurbüro Mangerig und Zapfe, München beauftragt, das im Februar 2005 seinen umfangreichen Bericht vorgelegt hat. In einer Gesamtbewertung kann anhand der Auswertung der vorliegenden Messgrößen festgestellt werden, dass die bereitgestellte Datenbasis eine hinreichende Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit aufweist, um ein fernüberwachtes Kontrollsystem aufzubauen.

Die Beauftragung des Ingenieurbüros zur Weiterentwicklung des Messprogrammes zu einem Monitoringsystem erfolgte im Herbst 2005, die ersten Ergebnisse wurden im Mai 2006 und Juni 2007 und im November 2008 vorgestellt.

### 3 Ergebnisse

Bei den riesigen Mengen von kontinuierlich erfassten Einzelmesswerten kommt einem automatisierten Datenmanagement eine zentrale Rolle zu. Die Rohdaten werden einer Datenkonsolidierung unterzogen, indem regelmäßige Messfehler, Störungen usw. identifiziert und durch eine angepasste Routine behoben werden.

Ergänzt wurden die Auswertungen durch wirklichkeitsnahe Tragwerksanalysen am räumlichen FE-Modell und Temperaturfeldberechnungen des Brückentrogas aus Wetterdaten. Die bisherigen Berechnungen zeigten eine sehr gute Übereinstimmung von Beobachtung und Simulation. Die Messergebnisse sind durch die FE-Berechnungen plausibel und nachzuempfinden. Fehler in der Messeinrichtung können dadurch eindeutig erkannt werden. Bei den Drucksensoren zur Lagerkraftmessung muss leider festgestellt werden, dass eine erhebliche Anzahl von Messfühlern ausgefallen ist, so dass bei der Strombrücke eine zielgerichtete Überwachung derzeit nicht möglich ist. Zwischenzeitlich wurde ein Lager der Strombrücke ausgebaut und mit neuen Sensoren versehen.

Eine IT-technische Integration in ein Monitoringprogramm wurde umgesetzt, das eine externe Überwachung der Brückenbauwerke von einem Computer mittels Datenfern-Übertragung gestattet. In der technischen Umsetzung sollten in der untersten Ebene die einzelnen Messreihen und in der darüber liegenden Ebene die durch Rechenoperation abgeleiteten Größen in graphischer Darstellung abrufbar sein. Diese beiden unteren Ebenen weisen eine hohe Informationsdichte auf, deren Beurteilung eine genaue Kenntnis der Messprogramme erfordert.

Des Weiteren kann das Programm in 2 Modi betrieben werden. Im Anwendermodus wird eine schnelle Übersicht erreicht. Wenn genauere Informationen gewünscht sind bzw. wenn der Ursache von möglichen Störungen oder Sensorausfällen nachgegangen werden soll, ist der Expertenmodus zu wählen.

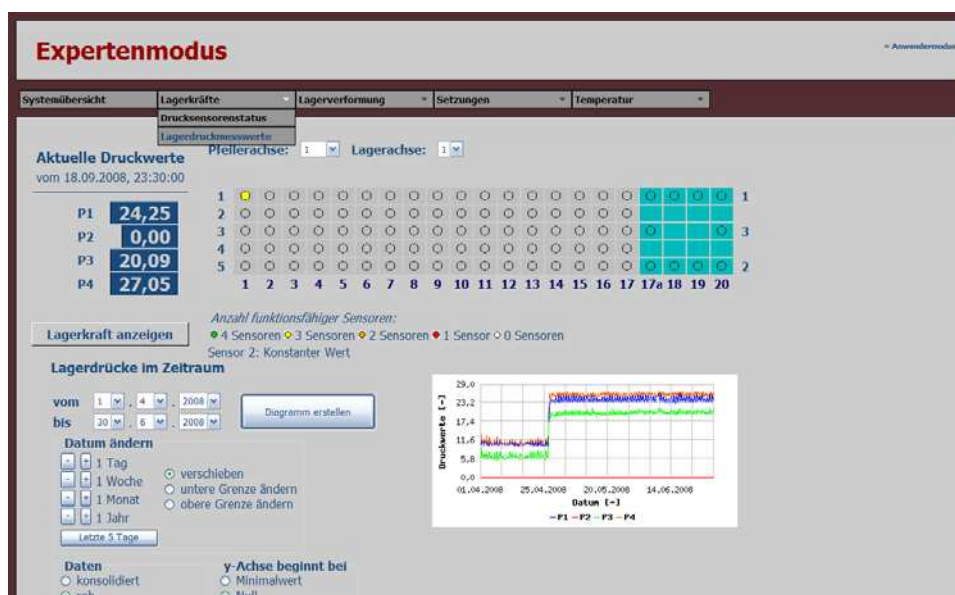


Bild 1: Beispiel für Expertenmodus: Einzelmesswerte der Lagerdrucksensoren

Um mit Hilfe des Monitoringsystems zeitnah Informationen über Störungen oder mögliche Beschädigungen zu erhalten, wurde eine weitere Ebene vorgesehen, die im Sinne einer Ampellösung durch Licht- und Tonsignale einen Warnstatus mit Ausweisung der Quelle einer Störung signalisiert. Da sich die direkten Messgrößen und die abgeleiteten Größen in Abhängigkeit von den Einwirkungen innerhalb einer gewissen Bandbreite bewegen, mussten Schwellenwerte definiert werden, bei deren Über- oder Unterschreitung ein Warnstatus ausgegeben wird.

Bei der probeweisen Anwendung des Monitoringsystems beim Entwickler im Jahr 2007 stellte sich heraus, dass die ursprünglich vereinbarte vereinfachte Berücksichtigung der gemessenen Temperaturbeanspruchung zu unangemessenen Störungsmeldungen führte. Daher wurde eine Erweiterung notwendig, um das nichtlineare Temperaturfeld wirklichkeitsnäher einzubinden.

Im Jahr 2007 wurde die Messeinrichtung um Gleitspalt- und Kippspaltmessungen sowie vereinzelt um Kraftmessungen an den Lagerrückverankerungen erweitert. Auch die Auswertung und Darstellung dieser Messgrößen war in das System zu integrieren, so dass es zu zeitlichen Verzögerungen kam. Die Programmierungen sind abgeschlossen, das System wurde beim WSA installiert und getestet und befindet sich seit 2010 im Wirkbetrieb. Die Untersuchungen des beauftragten Ingenieurbüros wurden durch Abgabe eines Schlussberichtes im Dezember 2009 abgeschlossen.

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

Das Vorhaben ist abgeschlossen, der Schlussbericht wird erstellt.

## **Bewertung der Korrosion von Spundwänden**

**Netzplan-Nr.:** A39510210108

**Projektleiter/in:** Dr. G. Binder, U. Gabrys, Abteilung Bautechnik, Referat Stahlbau, Korrosionsschutz (B2)

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

### **1 Problemstellung und Ziel**

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

Spundbohlen aus Baustahl unterliegen der Korrosion und sind daher in ihrer Gebrauchstauglichkeit begrenzt. Grundsätzlich erfolgt der korrosive Materialabtrag durch Immersionsmedien wie Wasser oder Boden.

Folgende Fragen sind für dieses Forschungsvorhaben zu bearbeiten:

- Sind Immersionsmedien und ihre Komponenten hinsichtlich Ihrer Korrosivität genauer zu erfassen, bzw. detaillierter zu gliedern?
- Gibt es einen Einfluss des Spundwandstahltyps auf die Korrosionsgeschwindigkeit?
- Sind mikrobiell induzierte Korrosionstypen (MIC) erkennbar, bzw. vorhersehbar?
- Welche weiteren Einflussparameter hinsichtlich des korrosiven Abtrags können erfasst werden?

Diese Fragestellungen galt es als Beitrag für das von der EU finanzierte ECSC-Forschungsvorhaben zu klären. Einige vertiefende Fragen wurden in diesem Vorhaben untersucht.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Bei der allgemeinen Zuordnung der Größe der korrosiven Abtrags zeigte sich in der Vergangenheit, dass es in den drei unterschiedenen Gewässertypen (Binnen-, Brack-, Meerwasser) erhebliche Streuungen gibt. Mit der statistischen Behandlung der Daten ließ sich eine Abrostungsformel herleiten, so dass die Bemessung der Spundbohlendicke auch hinsichtlich der Korrosion gestaltet werden könnte.

Wenn darüber hinaus außerhalb der Hauptabrostungszonen noch Korrosion auftritt, so sollten diese an besondere Konditionen (u. a. Stahltyp, MIC) geknüpft sein, die evtl. beim Neubau bzw. bei der Schadensbehebung zu berücksichtigen sind.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Im EU-Forschungsvorhaben sind die Ergebnisse mittlerweile eingearbeitet und dienen u.a. als Basis für umfangreiche statistische Untersuchungen. Ergänzende bzw. vertiefende Fragenstellung sollten in diesem BAW-Forschungsvorhaben bearbeitet und geklärt werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

In Variationsdiagrammen wird zunächst versucht, einen Bezug der Salinität (synonym hierfür  $W_o$  nach DIN 50929) der Immersionsmedien zu den tatsächlichen Abrostungen der Bauwerke zu finden. Durch Bestimmung der Rostphasen (FTIR-Spektroskopie, Röntgenbeugung) wird versucht, einen möglichen Einfluss von Mikrobiell Induzierte Korrosion (MIC) zu finden oder auszuschließen. Weitere Daten, wie z.B. Gefüge und Abrostungsverhalten älterer Spundwandstähle gegenüber den „Jüngeren“ werden in die Betrachtungen mit aufgenommen.

### **3 Ergebnisse**

#### **3.1 Chemische Zusammensetzung der Immersionsmedien**

Durch die Bestimmung des Wasserchemismus' an den ausgewählten Bauwerken kann gegenüber früheren Annahmen eine neue Zuordnung der drei Typen – Meer-, Brack- und Binnenwasser – erstellt werden. Die Ionen-Konzentrationen der Wässer liegen nach den Untersuchungen im Sommer

und Winter in ähnlichen Größenordnungen vor. Veränderungen lassen sich aber wie folgt zusammenfassen:

Für die maßgeblichen Parameter (Chlorid, Sulfat, Calcium, pH-Wert, Leitfähigkeit und Säurekapazität) liegen die Konzentrationen im Sommer gegenüber Winter durchschnittlich höher was mit einem Eindampfungseffekt, bzw. jahreszeitlich unterschiedlichen Zuflüssen vom Festland (bei Brackwasser!) zu erklären wäre.

Hingegen sind die Konzentrationen des löslichen organischen Kohlenstoffes im Winter deutlich erhöht. Möglicherweise hat dies mit der (eingeschränkten) biologischen Aktivität der Meeresbewohner bzw. Pflanzen bei niedrigeren Temperaturen zu tun.

Die Betrachtung der Abrostung von Spundwänden erfolgte im Vergleich zur Salinität der Immersionsmedien und dem Alter der Bauwerke. Dabei wurde zunächst ein Zusammenhang mit den Abrostungsraten ( $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ ) für die ausgewählten Bereiche der Salinität (Wo nach DIN 50929) bestätigt. Zugleich verringern sich aber die Abrostungsraten mit der Nutzungsdauer, was mit der Bildung von "Schutzschichten" durch Rost erklärt werden kann.

Da demnach Standzeit (Aufbau von schützenden Rostschichten) und Salinität von Einfluss sind, wurde mittels 3-Komponenten-Darstellung versucht die Abrostung damit in Zusammenhang zu stellen. Es zeigte sich jedoch, dass hier noch zu große Ungenauigkeiten vorliegen. Demzufolge kann erst bei Einbeziehung aller erstellten Daten (s. oben) und mit Hilfe einer multifunktionalen Faktoranalyse Berechnung eine Zuordnung vorgenommen werden (s. ECSC-Vorhaben). Dies gilt allerdings nur für die Bereiche der o.g. drei Gruppen von Gewässertypen.

### 3.2 Rostuntersuchungen

Anreicherungen an *Schwefel* (S) in den Unter- und Niedrigwasserzonen der Binnengewässer sind, im Unterschied zu Brack- und Meerwasser (ca. 3-4 M.-% S im Mittel), kaum festzustellen. In den Spritzwasserzonen aller drei Wassertypen liegen die S-Gehalte meist unter 0,15 M.-%. Dies spricht insgesamt betrachtet weniger für eine (zufällige) Sulfat-Ausfällung aus dem Wasser, sondern für einen Einbau bzw. eine aktive Beteiligung bei der Rostbildung durch Schwefel bzw. Sulfat.

*Kohlenstoff* (C) liegt in allen Wassertypen und -zonen, hier besonders in der Unter- und Niedrigwasserzone, angereichert vor (u.a. durch Eisenverlust beim Korrosionsvorgang!). Meist dürfte es sich um Ausfällungen von Karbonatphasen (Calcit, Aragonit) oder Bewuchs (Muscheln, Seepocken) handeln. Nach dem jetzigen Stand der Untersuchungen könnte MIC aufgrund des Indikators *Siderit* ( $\text{FeCO}_3$ ) für einige Bauwerke nicht ganz ausgeschlossen werden.

### 3.3 Stahluntersuchungen

#### Chemische Analytik

Die Stahlproben aller 40 Bauwerke zeigen vor allem in „alten“ Spundbohlenstählen höhere Phosphorkonzentration mit 0,03 bis 0,1 M.-%. Bei einer Altersgruppe jünger als 32 Jahre tritt deutlich erniedrigter P-Gehalt ( $< 0,05$  M.-%) auf. Daraus kann geschlossen werden, dass zwei Gruppen (alte Stähle hoher und jüngere Stähle niedrigerer P-Gehalte) von Spundbohlenstählen zum Teil zeitlich nebeneinander existierten.

#### Mechanische Eigenschaften

Hinsichtlich der Zuordnung kann gesagt werden, dass die meisten der untersuchten Stähle die geforderten Werte für Streckgrenze und Zugfestigkeit eines (modernen) S270GP (nach DIN EN 10248-1) erreichen.

#### Gefügeuntersuchungen

Die Anschliffe der Stähle zeigen unter dem Mikroskop ausschließlich das erwartete ferritisch-perlitische Gefüge, welches typisch für Baustähle ist. Die Lineation des Gefüges ist im Inneren eines Stahlbleches deutlicher ausgeprägt als im (rekristallisierten) äußeren Bereich. Bei der Abrostung einer Spundwandbohle kann dies dazu genutzt werden, die korrodierte Seite (Land/Wasser) eindeutig zu bestimmen, was bei einer bloßen Restwanddickenmessung durch Ultraschall nicht möglich ist.

### Stromdichte-Potential-Messverfahren

Mit Hilfe von *Stromdichten-Potential-Messungen* wurden Stahlproben von Spundbohlen in künstlichem Meerwasser untersucht. Dabei zeigen die Stähle "alten Typus" die höchsten Korrosionsraten. Hierdurch widersprachen sich die Resultate jedoch mit den in situ gemessenen Korrosionsraten. Somit können Labormesswerte nicht ohne weiteres auf das (geplante) Bauwerk übertragen werden. Die Begründung könnte in der unterschiedlichen Ausbildung von "Rostschuttschichten" im Labor und in der Natur liegen. Das heißt, im Labor würden lediglich die Anfangskorrosionsraten bestimmt werden.

### 3.4 Vergleich verschiedener Spundbohlentypen

Bei Untersuchungen der Abrostungen von zwei Spundwandbauwerken mit identischem Immersionsmedium konnte mittels chemischer Analytik ein deutlicher Unterschied in der Zusammensetzung der Stähle festgestellt werden. Trotz des höheren Kupfergehalts bei einem der Bauwerke, entsprechend moderner und angeblich korrosionswiderstandsfähiger Spundbohlenstählen, konnte kein eindeutiger Vorteil im Korrosionsverhalten festgestellt werden.

### 3.5 Auswertungen - Berechnungen

Es wird der Versuch unternommen, Abrostungsraten, unter Einbeziehung aller Inversionsmedien, in Abhängigkeit zu deren Stahlaggressivität, zu erstellen. Damit soll eine grobe Einschätzung der zu erwartenden Korrosionsgefährdung von Spundwandbauwerken in erster Näherung geliefert werden (Bild 1).

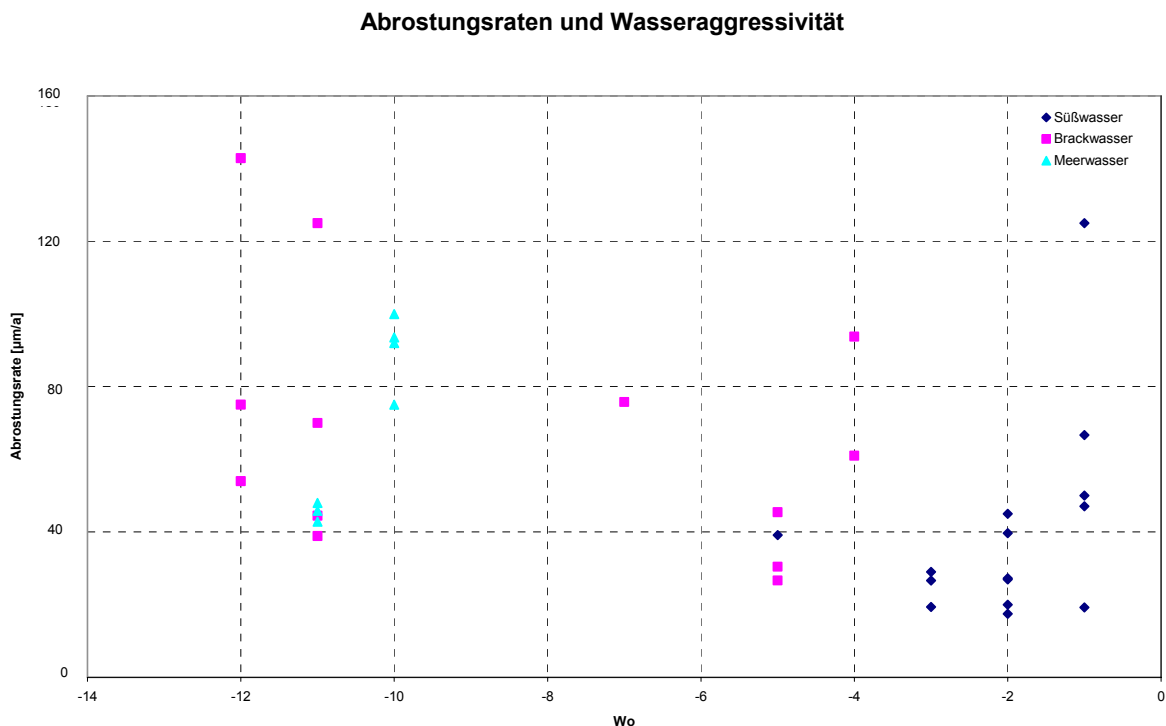


Bild 1: Abrostungsraten von Spundbohlen in Abhängigkeit von der Korrosivität ( $W_o$ ) der Immersionsmedien

### 3.6 Schlussfolgerungen

Mit der Bestimmung der Wasserchemie von Immersionsmedien (Sommer/Winter) und der chemischen Analyse von Spundwandstählen im Rahmen dieses Forschungsvorhaben wurden die Parameter zur korrosiven Betrachtung der Abrostungsdaten beigesteuert. Die Auswertungen im ECSC-Forschungsvorhaben haben gezeigt, dass Durchrostungen von Spundbohlen nicht immer mit der



maximalen Abrostung (z.B. in der Tideniedrigwasser-Zone) zusammenfallen. Vielmehr können sie über die ganze Tiefe der Spundbohle verteilt sein. Bei der Zusammenstellung und Überprüfung von Spundwandkorrosionsschadensfällen deutet sich allerdings an, dass außerhalb des Wasserwechselbereiches (maximale Korrosion) die Mikrobiell Induzierte Korrosion die Ursache für die so genannten anomalen Löcher sein sollte. Hierzu wird eine Zusammenstellung aller bisherigen Schadensfälle vorgenommen, um typische Schadenscharakteristika herauszustellen, die zukünftig zur Vermeidung von MIC herangezogen werden können.

Abrostungsmessungen an Spundwänden von Cu-legiertem Stahl ergaben noch keine zweifelsfreien Hinweise auf verbesserten Korrosionsschutz durch diesen Stahltyp.

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

Das Projekt wurde inhaltlich im Jahr 2009 abgeschlossen; im Jahr 2010 wird ein Abschlussbericht erstellt.

## **Klassifizierung stahlwasserbautypischer Kerbdetails**

**Netzplan-Nr.:** A39510210163

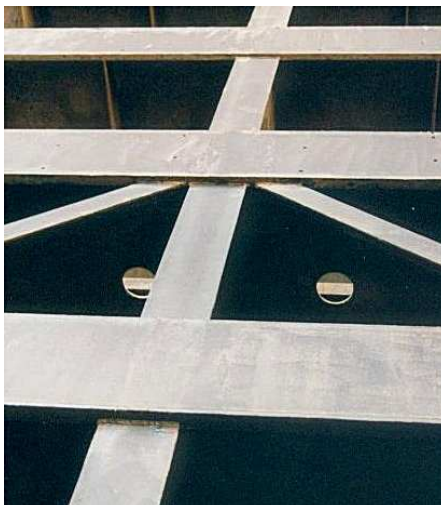
**Projektleiter:** Dipl.-Ing. W. Meinhold, Abteilung Bautechnik, Referat Stahlbau, Korrosionsschutz (B2)

**E-Mail:** wilfried.meinhold@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

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

Wegen aufgetretener Risschäden haben in den zurückliegenden Jahren Problemstellungen der Ermüdungsfestigkeit für die Bemessung und Konstruktion geschweißter Stahlwasserbaukonstruktionen eine zunehmende, für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung letztlich auch kostenmäßige Bedeutung erlangt. Bekannt ist, dass konstruktions- und fertigungsbedingte Kerbwirkungen die entscheidende Ursache von Ermüdungsrissen in geschweißten Konstruktionen bilden.



Im Regelwerk sind einige Kerbdetails nicht erfasst bzw. anhand der Darstellung nicht eindeutig zuordnungsfähig.

Eine ältere, geschweißte, jedoch noch nicht schadhafte Riegelkonstruktion eines Hubtores zeigt Bild 1.

*Bild 1: Typische Kerbfallsituation im Druckgurt-Bereich (Gurtkreuze) eines älteren geschweißten Rieglertors*

#### **1.2 Bedeutung für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)**

Bei Ertüchtigungsmaßnahmen, Ersatzinvestitionen oder beim Entwurf neuer Verschlusskonstruktionen kann es zur Fehleinschätzung vorliegender oder konstruktiv gewählter Kerbfallsituationen kommen. Der Nachweis ausreichender Ermüdungsfestigkeit bestimmter Tragwerksdetails kann aus diesem Grunde nicht oder nicht korrekt geführt werden. In einigen Fällen kann es auch zu einer zu ungünstigen Einschätzung der vorliegenden Kerbfallsituation kommen, so dass Ertüchtigungsbedarf angezeigt wird, der ggf. vermeidbar wäre.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel des FuE-Vorhabens war es deshalb, zwei stahlwasserbautypische Konstruktionsformen, die bisher nicht Bestandteil des verfügbaren Regelwerks sind bzw. gemäß Regelwerk nicht eindeutig zugeordnet werden können, numerisch und experimentell zu untersuchen.

Im Ergebnis von Dauerschwingversuchen waren für die beiden ausgewählten stahlwasserbautypischen Konstruktionsformen kerbfallabhängige normierte Wöhler-Kennlinien aufzustellen. Die so definierten neuen Kerbfallklassen sollen beim Ermüdungsnachweis unter Verwendung der Nennspannungsschwingbreiten für entsprechende Stahlwasserbauten genutzt werden.

## 2 Untersuchungsmethoden

Die theoretischen und experimentellen Untersuchungen übernahm die Universität Karlsruhe; zur Unterstützung der Arbeiten wurde unter der Schirmherrschaft der Forschungsvereinigung Stahlanwendung (FOSTA) ein projektbegleitender Arbeitskreis (AK P 589) gebildet. Nach der Festlegung möglichst praxisbezogener Querschnittswerte im Bereich der ausgewählten Kerbdetails (Bild 2) erfolgte im Rahmen einer F-E-Parameterstudie zunächst die Untersuchung des Einflusses der Breiten- und Wanddickenverhältnisse der Bleche auf den zu berücksichtigenden Spannungskonzentrationsfaktor (SCF).

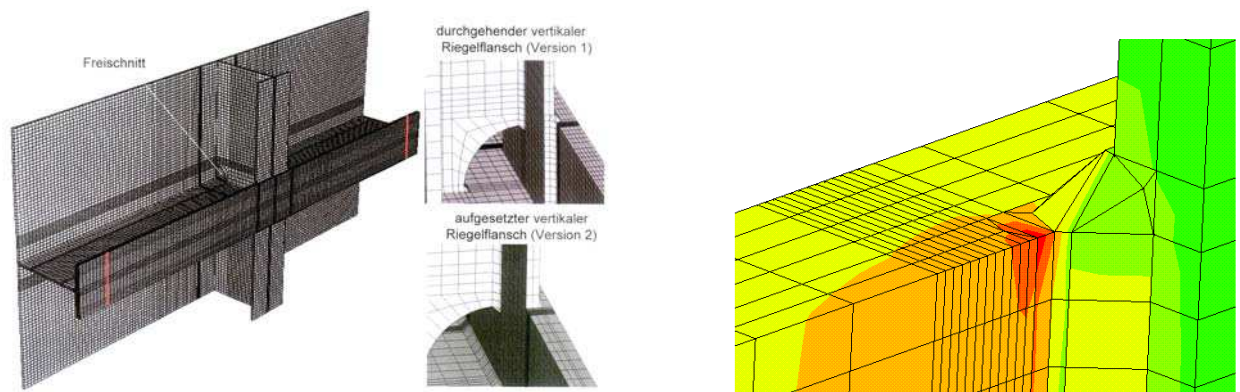


Bild 2: Numerische Untersuchungen: FE-Modell der Probekörper für den Bauteilversuch, Kerbdetail 1 und 2; FEM-Ausschnitt Kerbdetail 1 (Lage von Spannungskonzentrationen)

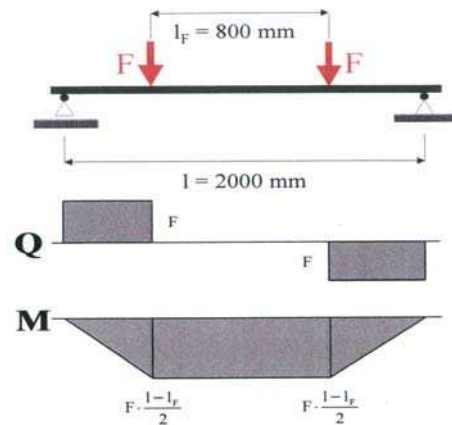


Bild 3: Bauteilversuch Kerbdetail 1, Lastbild für die Bauteilversuche

In einem weiteren Schritt wurden von den bei der Projektrealisierung mitwirkenden Stahlbauunternehmen für die Konstruktionsdetails verschiedene Probekörper hergestellt. Diese wurden schließlich bei der Universität Karlsruhe im Dauerschwingversuch geprüft. Die experimentellen Untersuchungen bestanden aus jeweils einem großmaßstäblichen Bauteilversuch (Bild 3) und aus der zusätzlichen Untersuchung von für beide Kerbdetails angefertigten Kleinprobekörpern (Bild 4), deren Geometrien anhand der Bauteilversuche und durch die vorangegangenen F-E-Berechnungen optimiert worden waren.

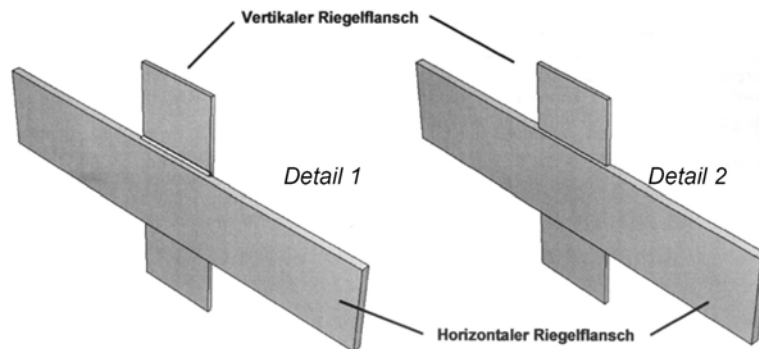


Bild 4: Kleinprobekörper Kerbdetail 1 und 2

### 3 Ergebnisse

Die im Vorfeld aufgestellte numerische Untersuchung zur Auswirkung des Breiten- und Wanddickenverhältnisses auf den Spannungskonzentrationsfaktor ergab, dass der Einfluss nur geringfügig ist.

Die Dauerschwingversuche an den beiden großformatigen Probekörpern und an den anhand des Versagensbildes hergestellten Ausschnitts-Probekörpern konnten, nachdem die Laufzeit des Projektes kostenneutral verlängert worden war, Ende 2005 abgeschlossen werden. Auf der Grundlage der an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Technische Universität Karlsruhe, durchgeführten numerischen und experimentellen Untersuchungen wurden in der Folge für das Kerbdetail 1 (hinter dem Riegelgurt durchlaufender Vertikalträger-Gurt) und für das Kerbdetail 2 (auf den Riegelgurt aufgesetzter Vertikalträger-Gurt) kerbfallabhängige Wöhler-Kennlinien aufgestellt und es ließ sich die Zuordnung zu einer Kerbklasse vornehmen. So wurde für das Kerbdetail 1 anhand der Bauteil- und Kleinprobenversuche eine Wöhlerkennlinie ermittelt, die der Kerbklasse  $\Delta\sigma_c = 71 \text{ N/mm}^2$  zugeordnet werden kann (95%-Fraktile:  $\Delta\sigma_{c,95\%} = 77,5 \text{ N/mm}^2$ , Steigung:  $m = 2,6 \approx 3,0$ ; vgl. Bild 5), während eine Auswahl gemäß EC 3 (EN 1993-1-9) nur eine Zuordnung zur Kerbklasse  $\Delta\sigma_c = 40 \text{ N/mm}^2$  (Detail ohne Nachbehandlung und Ausrundungsradius) bzw. gemäß GL-Kerbfallkatalog  $\Delta\sigma_c = 50 \text{ N/mm}^2$  ( $t_2 \leq 0,7 t_1$ ) zuließe. Ähnliches ergab sich für das Kerbdetail 2. Es zeigte sich jedoch, dass für eine ausreichende statistische Absicherung der Ergebnisse noch einige ergänzende Untersuchungen an Kleinprobekörpern vorgenommen werden sollten.

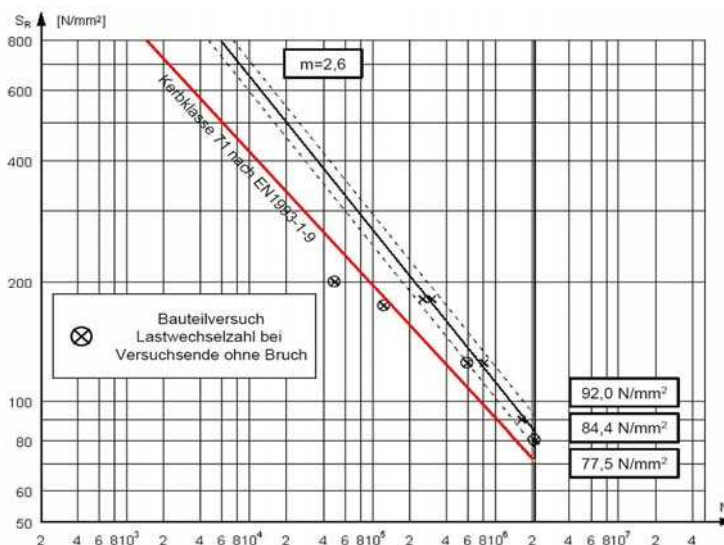


Bild 5: Wöhlerlinie für Kerbdetail 1 (hinter dem Riegelgurt durchlaufender Vertikalträger-Gurt)

Die im Rahmen des FuE-Projekts „Klassifizierung stahlwasserbautypischer Kerbdetails“ gewonnenen Ergebnisse werden dabei helfen, die Lebensdauer bestehender Stahlwasserbauten und ermüdungs-

relevant beanspruchte Tragwerksteile zukünftiger Verschlusskonstruktionen hinsichtlich ihres Ermüdungswiderstands besser beurteilen zu können. Letztlich konnten für beide Kerbdetails kerbfallabhängige Wöhler-Kennlinien aufgestellt werden und es konnte eine Zuordnung zu Kerbklassen vorgenommen werden, die deutlich günstiger als im verfügbaren Regelwerk liegen.

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

Das FuE-Vorhaben wird mit dem vorliegenden Ergebnisstand zunächst als abgeschlossen betrachtet. Einige ergänzende, für die zusätzliche statistische Absicherung gedachte Untersuchungen an Kleinproben werden ggf. noch im Rahmen einer Fortschreibung des Themas abgehandelt. Eine ausführliche Darstellung der Untersuchungsergebnisse enthält [1].

#### **5 Literatur**

- [1] Abschlussbericht „Forschung für die Praxis P 589, Klassifizierung stahlwasserbautypischer Kerbdetails“, veröffentlicht im Juni 2007 von Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), erhältlich unter Bestell-Nr. P 589 ISBN 3-937567-49-6 bei „Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf“

## **Vergleichende Untersuchungen zu Bohrmethoden**

**Netzplan-Nr.:** A39520110028

**Projektleiter:** M. Pietsch, Abteilung Geotechnik, Referat Grundbau (G 2)

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

### **1 Problemstellung und Ziel**

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

Für Baugrunderkundungsbohrungen in der WSV werden bei Ausschreibungen zwei verschiedene Bohrverfahren angeboten, der mechanische Rammhammer an einem Seilschlagwerk und ein pneumatischer Rammhammer „(Düsterloh-Hammer)“. Unter Fachleuten ist umstritten, ob bei beiden Verfahren die zu erreichenden Güteklassen der Bodenproben gleich sind und sie damit den Ausschreibungsanforderungen entsprechen können. Da in allen Fällen immer nur ein Bohrverfahren zum Einsatz kam, gibt es bisher keine Informationen, die den direkten Vergleich erlauben.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Aufgrund des beabsichtigten Untersuchungsziels können den ausschreibenden Stellen der WSV fundierte Beurteilungskriterien für Ausschreibungen für die Fälle an die Hand gegeben werden, in denen bis jetzt immer wieder verschiedene Meinungen aufeinander stoßen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Durch das Abteufen zweier in unmittelbarer Nachbarschaft gelegener Bohrungen mit jeweils einem der beiden Bohrverfahren soll eindeutig festgestellt werden, inwiefern die Verfahren vergleichbar sind, oder wo sich Unterschiede zeigen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen sollen eindeutige Hinweise für die Ausschreibung von Baugrundaufschlussbohrungen gegeben werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Auf einem durch Vorerkundungen bekannten Baufeld in der Nähe des Emscher Dükers unter dem RHK wurden Kernbohrungen in einem Rasterfeld mit den beiden Verfahren parallel abgeteuft. Zur Ergänzung wurden zwei Bohrungen mit großem Durchmesser abgeteuft und in diesen Bohrrohren jeweils Gefrierkerne von 1 m Länge entnommen um eindeutige Informationen zu gewinnen, inwiefern die mit dem anderen Verfahren entnommenen Kerne gestaucht wurden oder der Boden Ent- oder Vermischungsprozessen unterworfen war. Die Entnahme von Gefrierkernen im Bohrrohr stelle ein völlig neues Entnahmeverfahren dar, das bislang an keiner anderen Stelle durchgeführt wurde.

Um Störungen durch den Transport der gewonnenen Bohrkerne zu vermeiden, wurde ein geotechnisches Feldlabor errichtet. Die in Kunststoffhüllen entnommenen Bohrkerne wurden im Feldlabor aufgeschnitten, fotografiert und in Einzelproben aufgeteilt. In 5 cm Abschnitten wurden der Wassergehalt und die Festigkeit mit dem Laborpenetrometer bestimmt. Zusätzlich wurden an ausgewählten Stellen einaxiale Druckversuche oder Versuche mit der Laborflügelsonde durchgeführt. An diesen Proben wurde ebenfalls jeweils der Wassergehalt bestimmt. Für die weitergehende Bodenansprache und die Bestimmung der Kornverteilung und ggf. weiterer Versuche wurden zahlreiche repräsentative Bodenproben entnommen. Das anstehende Material erlaubte es nur in den wenigen Fällen, in denen eine ausreichende Kohäsion vorhanden war, Kernstücke zu entnehmen. Überwiegend wurden Becherproben entnommen.

Die Entnahmestelle war aufgrund der Kenntnis aus den Vorerkundungen gewählt worden, weil hier über große Tiefen sandige Schluffe und schluffige Sande anstanden, die, insbesondere wenn sie wie hier locker gelagert sind, sehr empfindlich auf Störungen durch das Entnahmeverfahren reagieren. Zu erwarten waren zum einen Sackungen aufgrund der lockeren Lagerung, Auflockerung durch Porenwasserüberdrücke beim Bohren unter dem Grundwasserspiegel, Entmischungsvorgänge infolge der dynamischen Einwirkung und Vermischung von Bodenschichten durch Tieferziehen des Randbereichs infolge der Wandreibung des Entnahmegärts.

Um Einflüsse infolge unterschiedlichen Bohrpersonals feststellen zu können, wurden die Vergleichsbohrungen von zwei verschiedenen Bohrunternehmen an zwei verschiedenen Standorten durchgeführt, so dass schließlich für jeden Standort ein Bodenprofil aus der Gefrierkernentnahme und jeweils zwei Bodenprofile aus jedem der genannten Bohrverfahren zur Verfügung standen.

Die entnommenen Kerne wurden unmittelbar nach dem Aufschneiden visuell begutachtet und fotografiert. Die Fotografien wurden hinsichtlich der Unterschiede zwischen den Verfahren und zwischen den Unternehmen optisch bewertet. Verglichen wurde außerdem die Änderung der Kornverteilung über die Tiefe zwischen den entnommenen Kernen einschließlich der Ergebnisse aus den Gefrierkernen. Die Gefrierkerne waren in 10 cm Abschnitte geteilt worden für die jeweils eine Kornverteilung ermittelt worden war. Schließlich wurden die Festigkeiten und die Wassergehalte der in jeweils der gleichen Tiefe entnommenen Proben miteinander verglichen.

### **3 Ergebnisse**

#### **3.1 Vergleich der Bohrunternehmen**

Beide Bohrfirmen haben die Erkundungsbohrung mit beiden Bohrverfahren abgeteuft. Jedoch liegen beim Bohrunternehmer I größere Erfahrungen mit dem mechanischen Schlagwerk vor, während Bohrunternehmer II häufiger mit dem pneumatischen Bohrhämmer arbeitet. Diese Erfahrung zeigte sich u.a. in der Handhabung des Seilschlagwerks. Unternehmer II hat mehrfach (1 m – 2 m, 2 m – 3 m, 3 m – 4 m, 4 m – 5 m, 7 m – 8 m, 8 m – 9 m, 11 m – 12 m) in der Bohrung BK II wesentlich höhere Schlagzahlen benötigt als Unternehmer I. Dies kann aus zwei Gründen erreicht werden: Entweder hängt das Seil zu schlaff, so dass das Seilschlagwerk nur eine geringe Auslenkung erreichen kann oder das Seil hängt zu straff, so dass das Rammgewicht ins Seil schlägt. Qualitative Unterschiede an den Bohrkernen infolge der unterschiedlichen Schlagzahlen waren nicht zu erkennen.

#### **3.2 Visueller Vergleich der aufgeschnittenen Bohrkern**

Trotz der relativen Nähe der jeweils vier Bohrpunkte der beiden Untersuchungsstellen sind in einem natürlich gewachsenen Untergrund Streuungen der Bodenparameter zu erwarten. Bei Auffüllungen können diese je nach Entstehung der Auffüllung sogar noch größer werden. Die obersten 6 m – 7 m der zweiten Untersuchungsstelle (BK II) sind aus Aushubmaterial des RHK aufgefüllt. Hier kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der jeweilige Aushub flächig verteilt wurde und infolge der jahrzehntelangen Liegezeit sich wie ein natürlich gewachsener Sedimentboden verhält. Signifikante visuelle Unterschiede der Bodenarten waren nicht auszumachen. Festgestellt werden konnten an einigen Stellen unterschiedliche Ergebnisse der beiden Bohrunternehmen: Die Fehlmenge (Verdichtung?) im Abschnitt von 1 m – 2 m von BK I war bei Unternehmer I höher als bei Unternehmer II. Im Abschnitt von 2 m – 3 m von BK I fehlen bei Unternehmer I ca. 20 cm des Kerns, während Unternehmer II einen vollständigen Kern abgeliefert hat. Im Abschnitt 1 m – 2 m von BK II ist der Kern von Unternehmer II ca. 10 cm kürzer als der von Unternehmer I. Im Abschnitt 2 m – 3 m von BK II fehlen bei Unternehmer I 20 cm bis 30 cm, kein Kernverlust bei Unternehmer II. Im Abschnitt 5 m – 6 m von BK II ist bei Unternehmer II ein geringer Kernverlust zu beobachten, bei Unternehmer I keiner. Alle diese Beobachtungen sind unabhängig vom eingesetzten Verfahren, so dass geschlossen werden muss, dass es sich hier um Handhabungsfehler des Bohrpersonals handelt. Einzige Ausnahme ist der Abschnitt 7 m – 8 m von BK II, wo vom Kern der mit dem pneumatischen Rammhämmer gewonnenen Proben 15 cm fehlen, alle anderen Kerne sind vollständig. Auch dies dürfte eher auf ein Handhabungsproblem deuten als auf Unterschiede der Verfahren.

#### **3.3 Gefrierkernentnahme im Bohrloch**

Zur Kontrolle der Schichtgrenzen und der Verteilung der Kornverteilung über die Tiefe waren an jedem Standort jeweils eine Bohrung mit Durchmesser 324 mm abgeteuft, wobei im Bohrrohr zunächst ein Gefrierkern von 1 m Länge entnommen wurde und dann der verbliebene Boden ausgeräumt wurde und nicht weiter untersucht wurde. Die Schwierigkeit einer Gefrierkernentnahme im Bohrrohr liegt insbesondere darin, dass die Gefrierzeit für einen ausreichend dicken Kern nur sehr grob abgeschätzt werden kann. Damit besteht die Gefahr, dass bei zu langer Gefrierzeit der Kern am Bohrrohr festfriert und daher nicht gewonnen werden kann. Bei zu kurzer Gefrierzeit werden zu kleine Kerne

gewonnen, um ausreichende Probenmengen für die Bestimmung einer Kornverteilung zu erhalten. Je feinerkörnig ein Boden wird, umso länger muss die Gefrierzeit sein, um einen ausreichend dicken Kern zu erhalten. Bei den hier vorliegenden Wechsellagen von Schluffen und Sanden und infolge der Tatsache, dass dieses Verfahren überhaupt erstmalig eingesetzt war, handelte es sich daher weitgehend um ein Probieren. An der Untersuchungsstelle BK I konnten von der Geländeoberfläche bis in 6,50 m Tiefe jeweils ein ausreichend dicker Kern gewonnen werden, ohne dass er an der Rohrwandung festfror. In den tiefer liegenden feinkörnigen Schichten war der Kern zum Teil recht dünn, jedoch sind für solche Böden auch nur geringere Mengen erforderlich, um die Kornverteilung zu bestimmen. Im steifen bis halbfesten Schluff unterhalb von ca. 6,20 m konnte kein Material gewonnen werden, da es entweder gar nicht angefroren war, oder aber die Lanze aus dem gefrorenen Boden herausgezogen wurde, da die Haftung an der Gefrierlanze im Vergleich zur Reibung zwischen gefrorenem und nicht gefrorenem Boden nicht ausreichend hoch war. Die Gefrierkerngewinnung an der Stelle BK II war dadurch kompliziert, dass man auf Gefrierkerne in der Auffüllung (ungefähr Geländeoberkante bis in eine Tiefe von 7 m) auf die Entnahme von Gefrierkernen verzichtete. Für die weitere Entnahme musste jedoch Lanze und Zuleitung entsprechend verlängert werden, so dass Temperaturverluste über diese Transportstrecke unvermeidlich waren. Die damalige Ausstattung für die Stickstoffzufuhr in die Lanze war nicht ausreichend, um zu gewährleisten, dass ausreichend viel Stickstoff mit immer noch ausreichend niedriger Temperatur bis in die Lanze gelangte. Die Kerne waren durchgehend sehr dünn und reichten nicht bis zur Spitze. Inzwischen ist die Ausstattung der BAW für die Gefrierkernentnahme entsprechend erweitert worden, so dass bei künftigen Untersuchungen Verbesserungen zu erwarten sind.

### 3.4 Entmischungerscheinungen

Rollige Böden können sich bei hohem dynamischen Energieeintrag dahingehend entmischen, dass gröberes Material im oberen Bereich und feineres Material im unteren Bereich konzentriert ist. Dieser Effekt ist unter Grundwasser noch verstärkt. Aus diesem Grund wurde der vergleichenden Bodenansprache der jeweils obersten und untersten 10 cm besondere Beachtung geschenkt. In keinem Fall konnte eine signifikante Abweichung der unteren 10 cm des oberen Bohrmeters gegenüber den oberen 10 cm des Folgemeters beobachtet werden. An ausgewählten Stellen wurde diese Bodenansprache durch entsprechende Kornverteilungsanalysen belegt. Die Aussage gilt für beide Verfahren.

### 3.5 Wassergehalte und Werte des Laborpenetrometers

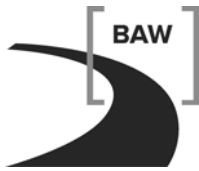
Überall dort, wo der Schluffgehalt hoch genug war um dem Material eine gewisse Kohäsion zu geben, wurden im 5 cm Abstand Versuche mit dem Laborpenetrometer durchgeführt und die daraus resultierende undrainierte Scherfestigkeit bestimmt. Parallel dazu wurde der Wassergehalt an dieser Stelle ermittelt. Die Wassergehalte schwanken in allen Bohrungen im Wesentlichen zwischen 0,2 und 0,3, bei Unternehmer II liegen sie verfahrensunabhängig häufiger unter 0,2, was bei Unternehmer I nur in Einzelfällen auftritt.

Die undrainierte Scherfestigkeit zeigt keine signifikanten Unterschiede der beiden Bohrverfahren, jedoch erstaunlicherweise Unterschiede zwischen den beiden Bohrunternehmen. Bei Unternehmer I wurden bis in 3 m Tiefe Scherfestigkeiten bis ca. 40 KPa ermittelt, wobei hier die Spitzenwerte bei Verfahren I höher liegen als bei Verfahren II. Von 3 m bis 6,50 m Tiefe wurden sehr geringe Festigkeiten (unter 5 KPa) ermittelt, während bei Unternehmer II in diesem Bereich Scherfestigkeiten bis zu 20 KPa erreicht werden, wobei die meisten der Werte zwischen 5 KPa und 10 KPa liegen. Auch ist bei Unternehmer II in beiden Verfahren zu beobachten, dass der Anstieg der Scherfestigkeiten infolge Erreichen des steifen Schluffhorizonts bereits bei 6,0 m erfolgt, während bei Unternehmer I dieser Anstieg erst bei 6,5 m zu verzeichnen ist. Dies kann jedoch auch auf örtlich schwankende Bodenschichtung zurückgeführt werden.

### 3.6 Schlussfolgerungen

Die Bohrergebnisse weisen durchaus Unterschiede auf, die jedoch durch die Bohrmannschaft und durch die auch auf kurze Entfernungen streuenden Bodeneigenschaften bedingt sind als durch Unterschiede in den beiden Bohrverfahren. Diese können daher als gleichwertig angesehen werden.





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

Das FuE-Vorhaben wurde in 2009 abgeschlossen.

**Grundwasser- und Wärmetransportmodelle**

Netzplan-Nr.: A39520305733

Projektleiter: Dr.-Ing. B. Odenwald, Abteilung Geotechnik, Referat Grundwasser (G3)

E-Mail: bernhard.odenwald@baw.de

**1 Problemstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Das Forschungsvorhaben dient zur grundsätzlichen Untersuchung von numerischen Verfahren der Grundwassermodellierung als Grundlage für die Ermittlung der Standsicherheit von Bauwerken an Wasserstraßen.

Im Rahmen der Dammnachsorge ist neben der Dammstandsicherheit auch die äußere (geotechnische) und innere (konstruktive) Standsicherheit von Bauwerken in Dämmen bzw. von einzelnen Bauwerksteilen zu untersuchen. Maßgebend ist dabei die Grundwasserdruckbelastung, die sich bei Ansatz eines hydraulischen Ausfalls (Leckage) der Kanaldichtung auf Grundlage des *Merkblatts Standsicherheit von Dämmen (MSD)* und der daraus resultierenden Dammdurchströmung ergibt. Die bisher im Rahmen der Dammnachsorge durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass diese Wasserdruckbelastung in der für die Bauwerke zugrunde gelegten Statik oft nicht angesetzt wurde und deshalb keine ausreichende Tragfähigkeit für einzelne Bauwerksteile (z. B. Flügelwänden, Sohlplatten) in der außergewöhnlichen Bemessungssituation nachgewiesen werden kann. Die Herstellung einer ausreichenden Tragfähigkeit der Bauwerksteile kann durch konstruktive Verstärkungen (z. B. Verankerungen) oder Dränagen zur Grundwasserdruckentlastung erfolgen. Da die hier vorgesehenen Dränagen nur im Belastungsfall (Leckage in der Kanaldichtung) wirksam werden, sie gleichzeitig als Beobachtungsinstrument geeignet sind und i. A. auch nachträglich vergleichsweise kostengünstig hergestellt werden können, stellen sie im Vergleich zu konstruktiven Verstärkungsmaßnahmen zumeist die bessere Variante zur Sicherung der Bauwerke dar. Zur Druckentlastung hinter Stützwänden kommen für den nachträglichen Einbau vor allem horizontale Rohrdränagen in Betracht, die durch die Stützwand bis in den dahinter anstehenden Baugrund reichen. Dadurch findet jedoch nur eine linienförmige Absenkung des Grundwasserstands im Belastungsfall entlang der Dränagen statt. Um die Grundwasserdruckbelastung auf die Stützwand und darauf aufbauend die Tragfähigkeit der Wand ausreichend genau ermitteln zu können, ist eine numerische Berechnung der sich bei Dammdurchströmung einstellenden räumlichen Grundwasserpotenzialverteilung erforderlich.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Gewährleistung der Standsicherheit und Dauerhaftigkeit von Dämmen an den Bundeswasserstraßen und den in den Dämmen angeordneten Bauwerken ist eine Kernaufgabe der WSV. Die Tragfähigkeit der Bauwerke wird unter Berücksichtigung eines Ausfalls der Kanaldichtung maßgeblich durch die aus der Dammdurchströmung resultierenden Wasserdruck- und Strömungskräfte beeinflusst. Bei Bauwerken, die keine ausreichende Tragfähigkeit in der außergewöhnlichen Bemessungssituation aufweisen, sind nachträglich eingebaute Dränagen zumeist als Sicherungsmaßnahme geeignet. Zur Bestimmung der erforderlichen Anzahl, Anordnung und Dimensionierung der Dränagen ist eine ausreichend genaue Ermittlung der durch die Dränagen beeinflussten Grundwasserverhältnisse bei der Dammdurchströmung erforderlich.

**1.3 Untersuchungsziel**

Die Untersuchungen dienen zur Festlegung einer geeigneten Vorgehensweise bei der numerischen Berechnung der Dammdurchströmung im Bereich von Bauwerken unter Berücksichtigung der wasserdruckentlastenden Wirkung von linienförmigen Dränagen. Weiteres Ziel ist die Bestimmung eines geeigneten Ansatzes zur Berücksichtigung der aus den Strömungsberechnungen resultierenden Wasserdruck- und Strömungskräfte in den Tragfähigkeitsnachweisen für das Bauwerk. Dabei soll mit möglichst geringem Modellierungsaufwand eine für die Aufgabenstellung ausreichende Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu erzielt werden.

## 2 Untersuchungsmethoden

Zur Festlegung einer geeigneten Vorgehensweisen bei der Grundwassermodellierung werden numerische Berechnungen unter Verwendung kommerzieller Programmsysteme mittels verschiedener Modellansätze (vertikal-eben, dreidimensional) und unterschiedlicher Modelldiskretisierungen durchgeführt und die Ergebnisse bewertet. Insbesondere untersucht wird dabei die ausreichende Abbildung der Strömung im unmittelbaren Anstrombereich der Dränagen, die durch vergleichsweise hohe hydraulische Gradienten geprägt ist. Eine unzureichende Abbildung der Strömungsverhältnisse führt hier zu einer Unterschätzung des Potenzialabbaus und daraus resultierend zu einer Überschätzung der durch die Dränagen erzielbaren Wasserdruckentlastung der Bauwerksteile.

## 3 Ergebnisse

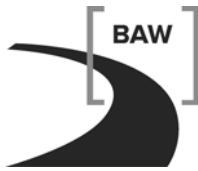
Zunächst wurden auf Grundlage synthetischer Grundwassermodelle unterschiedlicher Komplexität für Dammschnitte mit Bauwerken, in denen Dränagen zur Wasserdruckreduzierung auf die Bauwerksteile berücksichtigt wurden, umfangreiche numerische Strömungsberechnungen durchgeführt. Die Berechnungen ergaben, dass für eine ausreichende Abbildung der Grundwasserströmung eine dreidimensionale Modellierung mit einer sehr feinen horizontalen und vertikalen Diskretisierung für den Anstrombereich der Dränagen erforderlich ist.

Weiterhin untersucht wurde die standsicherheitserhöhende Wirkung unterschiedlicher Dränagesysteme. Dabei zeigte sich, dass einfache Entlastungsöffnungen in den Stützbauwerken aufgrund ihrer fehlenden Tiefenwirkung nur eine äußerst geringe Wasserdruckreduzierung bewirken. Auch unmittelbar entlang der Rückseite des Stützbauwerks verlaufende Rohrdränagen haben i. A. keine ausreichende standsicherheitserhöhende Wirkung, da die Wasserdruckreduzierung an der Wand zu einem großen Teil durch die im aktiven Erdkeil wirkenden, auf die Wand gerichteten Strömungskräfte kompensiert wird. Dagegen kann zumeist mit einer relativ geringen Anzahl von senkrecht durch Wand angeordneten, horizontalen Rohrdränagen, die bis hinter die aktive Gleitfuge hinter dem Stützbauwerk reichen, bereits eine ausreichende Erhöhung der Standsicherheit erzielt werden kann. Insgesamt haben die Untersuchungen gezeigt, dass der Einbau derartiger Horizontaldränagen eine geeignete Variante zur nachträglichen Sicherung von Bauwerken in Dämmen darstellt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden bei den BAW-Kolloquien über die neue Fassung des Merkblatts Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD 2010) am 04.11.2009 in Karlsruhe und am 19.11.2009 in Hannover sowie auf dem Kolloquium „Bauen in Boden und Fels“ der Technischen Akademie Esslingen (TAE) am 26.01.2010 vorgestellt.

## 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das Forschungsvorhaben wurde in 2009 beendet. Der Abschlussbericht wird in 2010 erstellt.



## **Infiltrationsdynamik in Erdbauwerken**

**Netzplan-Nr.:** A39520310047

**Projektleiter:** Dr.-Ing. H. Montenegro, Abteilung Geotechnik, Referat Grundwasser (G3)

**E-Mail:** hector.montenegro@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

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

Infiltrationsprozesse im Bereich von Baugruben oder Erdbauwerken können die Porenwasserdruckverteilung sowie die Grundwasserströmungskräfte im Baugrund nachhaltig beeinflussen. Eine genaue Beschreibung der Infiltrationsprozesse stellt eine Grundvoraussetzung dar, um die Veränderung von Belastungssituationen infolge von Infiltration zu bewerten und Sicherungsstrategien zu entwickeln. Im Mittelpunkt des Forschungsvorhabens steht die Modellierung von Infiltrationsprozessen im Baugrund und in Erdbauwerken. Die Untersuchungen beinhalten die Behandlung heterogener Durchlässigkeitsstrukturen bei der Dammdurchströmung, die Berücksichtigung von Lufteinschlüssen im Porenraum der Wasserwechselzone und deren Auswirkungen auf die Druckfortpflanzung bei raschen Wasserstandsänderungen, sowie die numerische Untersuchung der Entlastungswirkung horizontaler Entlastungsbrunnen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Im Rahmen von Baumaßnahmen kann es planmäßig zum Ausfall einer Kanaldichtung kommen, wodurch Kanalwasser in den Untergrund infiltrieren und einen erheblichen Grundwasseranstieg bewirken kann. In diesem Fall stellt sich die Frage, ob durch Entlastungsbrunnen das zuströmende Wasser schnell genug abgeführt werden kann, um einen etwaigen Belastungsanstieg infolge Grundwasserdruck und -strömung auf Baugrubenböschungen, Brückenwiderlager, Flügelwände usw. zu begrenzen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

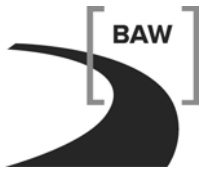
Ziel der Untersuchungen war es, Erfahrungen bei der numerischen Modellierung von Infiltrationsprozessen im Untergrund zu sammeln. Im letzten Berichtszeitraum wurden die Anforderungen für die Diskretisierung der Filterbereiche in Entlastungsbrunnen näher untersucht. Auf Grundlage von Modellberechnungen sollte der Zusammenhang zwischen der mittels Horizontalbrunnen erzielbaren Entlastungswirkung in Abhängigkeit von den hydraulischen Eigenschaften des Bodens sowie der Brunnenauslegung (Filterabstand, -durchmesser und -länge) bestimmt werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Die Grundwasserströmungsverhältnisse im Zuströmungsbereich der Entlastungsbrunnen werden auf Grundlage eines 2-dimensionalen (radialsymmetrische Berechnung, Hydrus2D) sowie eines 3-dimensionalen Grundwassermodells (FEFLOW) untersucht.

### **3 Ergebnisse**

Es wurde der Versuch unternommen, dimensionslose Bemessungsdiagramme für den Einsatz horizontaler Entlastungsbrunnen zu erarbeiten. Um die Zahl der Parameter überschaubar zu halten, mussten erhebliche Vereinfachungen hinsichtlich Strömungsgeometrie und Randbedingungen gewählt werden. Es stellte sich heraus, dass auf solche Vereinfachungen basierende Ergebnisse nicht sehr aussagefähig sind, wenn die Gegebenheiten der zu behandelnden Fragestellung von den getroffenen Annahmen abweichen. Für eine hinreichende Abschätzung der Wirksamkeit von Entlastungsbrunnen sind daher 3D-Modelle erforderlich, in denen die lokalen Gegebenheiten (Geometrie, Schichtung, Randbedingungen und -zuflüsse usw.) abzubilden sind.



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

Die im Verlauf des vorliegenden Forschungsvorhabens gesammelten Erfahrungen bei der Modellierung unterschiedlicher Grundwasserströmungsprozesse in Erdbauwerken werden im Abschlußbericht zusammengestellt. Das FuE-Vorhaben wurde in 2009 abgeschlossen. Eine Fortsetzung des Forschungsvorhabens ist nicht vorgesehen.

## **Verzerrte aerodynamische Modelle**

**Netzplan-Nr.:** A39530210078

**Projektleiterin:** Dipl.-Ing. P. Faulhaber, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat Flusssysteme II (W2)

**E-Mail:** petra.faulhaber@baw.de

## **1 Problemdarstellung und Ziel**

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

Das Forschungsprojekt zielt auf die Verbesserungen in der Methodik eines Spezialgebietes der Maßstabsmodelle für flussbauliche Untersuchungen, die aerodynamischen Modelle. Die aerodynamische Modellierung von Flusstörungen wird in Deutschland hauptsächlich in der BAW genutzt, so dass hier aus der Vergangenheit umfangreiche Erfahrungen vorliegen. Neue Anforderungen (z.B. Untersuchung von Gewässerrandbereichen) und neue Messtechniken ermöglichen und erfordern die Verbesserung der Untersuchungsmethodik. Im Rahmen des Forschungsprojektes werden darüber hinaus systematische Untersuchungen zur Optimierung von Regelungsbauwerken durchgeführt.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Für frei fließende Gewässer haben sich in der Vergangenheit aerodynamische Analogiemodelle (Luftmodelle) bei der Bearbeitung wasserbaulicher Fragestellungen durch ihre hohe Effizienz (geringe Modellabmessungen, kurze Auf-, Umbau- und Messzeiten) bewährt. Sie bieten vielfältige Möglichkeiten der Analyse der Strömungsvorgänge sowohl durch Messung der Strömungsparameter (Druck, Fließgeschwindigkeit, Durchfluss) als auch durch die Sichtbarmachung schwer abbildbarer Strömungsstrukturen wie z.B. der für den Geschiebetransport maßgeblichen Sohlstromlinien. Zur Untersuchung von wasserbaulichen Fragestellungen im Auftrag der WSV können bei entsprechenden Fragestellungen aerodynamische Modelle effektiv eingesetzt werden. Zur Optimierung der Untersuchungsmethoden dient das Forschungsprojekt und liefert darüber hinaus Ergebnisse zu Grundsatzproblemen der Regelung von Flüssen.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Eine Neuerung bei den aerodynamischen Modellierungsverfahren in der Bundesanstalt für Wasserbau besteht in der Modellierung mit sog. variabler zusätzlicher Überhöhung. Diese Modellierungsmethode („verzerrte Modelle“) kam bereits mehrfach in praktischen Untersuchungen zum Einsatz, erfordert aber eine weitere theoretische Untermauerung und die Einführung neuer Verfahren zur Topografie-Modellierung und Modellauswertung. Im Rahmen des Forschungsprojektes sollen die Einflüsse der Modellierungsmethode auf die Ergebnisse ermittelt werden. Daraus sollen Grenzen des Methodeneinsatzes und geeignete Modellierungsparameter abgeleitet werden. Darüber hinaus sollen neue Mess- und Modellierungsverfahren eingeführt werden. Außerdem werden weitere Untersuchungen an Prinzipmodellen durchgeführt, soweit diese zur Entwicklung der verschiedenen aerodynamischen Modellierungsmethoden beitragen.

## **2 Untersuchungsmethoden**

Im Forschungsprojekt werden verschiedene Untersuchungsmethoden genutzt. Zu folgenden Untersuchungen wurden die Ergebnisse in früheren Forschungs-Kompodien zusammengefasst.

- Systematische Untersuchungen zum Vergleich verschiedener Modellierungsmethoden in einer aerodynamischen Versuchsrinne.
- Test verschiedener Methoden zur Geschwindigkeitsmessung incl. Particle Image Velocimetry [1] und Untersuchung zur Wirkung der Variation vom Winkel der Bühnenachse zur Streichlinie auf das Geschwindigkeitsfeld in einem Prinzipmodell. Neue Methoden der Geschwindigkeitsmessung wurden in den Wirkbetrieb überführt.
- Systematische Untersuchungen zur morphologischen Wirkung von Regelungsbauwerken und zur Eignung von aerodynamischen Modellen für solche Untersuchungen.
- Neue Methoden der Topografie-Modellierung wurden getestet und inzwischen angewendet.

### 3 Ergebnisse

Die bisherigen Ergebnisse der noch nicht abgeschlossenen Untersuchungen in der Versuchsrinne und am Bühnen-Prinzipmodell lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

#### Versuchsrinne

Im Luftlabor wurde eine Versuchsrinne von 3 m Länge und 30 cm Breite aufgebaut. Die Strömungstiefe kann durch Verstellen der Grundplatte variiert werden (maximal 10 cm Tiefe). In dieser Versuchsrinne werden systematische Untersuchungen zum Einfluss der Modellierungsmethode auf die Ergebnisse (auf Naturwerte übertragen) durchgeführt. 30 Messkampagnen wurden durchgeführt. Die Rinne wurde dazu leer, mit einer Geometrie mit konstanter Überhöhung und mit einer Geometrie mit variabler Überhöhung betrieben. Die Strömungstiefen wurden zwischen 20, 30 und 40 mm variiert. Die Sohlrauheit wurde modifiziert. Die Rinnenmessungen wurden in einer Datenbank erfasst, sind jedoch bisher nicht umfassend ausgewertet. Die Ergebnisse beinhalten Angaben zur Sohlrauheit bei verschiedenen Sohlmaterialien und die Wirkung verschiedener Überhöhungsmethoden auf die gemessenen Geschwindigkeiten. Ein Berichtsentwurf und ein Praktikumsbericht liegen vor.

#### Prinzipmodell zur Untersuchung von Bühnen

Die BAW untersucht gemeinsam mit der BfG neue Bühnenformen, die sowohl hydraulisch-morphologischen als auch ökologischen Anforderungen gerecht werden sollen (siehe auch Projekt Hydraulische Wirkung von Stromregelungsbauwerken in diesem und den vorangegangenen Forschungskompodien der BAW). Für die systematischen Untersuchungen unterschiedlicher Bühnenformen wurde ein Luftmodell als überhöhtes zweidimensionales halbes Flussmodell der Mittel-Elbe konzipiert (Maßstäbe: Länge 1:365, Höhe 1:114). Im gesamten Untersuchungsbereich wurde sowohl im Flussbett als auch in den Bühnenfeldern mit der gleichen Strömungstiefe (modellierte Tiefe 28 mm, Natur 3,2 m) gearbeitet. Die Bühnen wurden vereinfacht mit einer Neigung (Kopf- und Seitenneigung gleich) von 1:1 im Luftmodell (entspricht einer Naturneigung von 1:3) modelliert.

In dem stark abstrahierten aerodynamischen Modell (quasi 2D-Prinzipmodell) wurde im Vorfeld zu den Untersuchungen am hydraulischen Modell (Schönberg/Elbe) die Strömung in den Bühnenfeldern durch ein sog. Erosionsverfahren für verschiedenen Bühnenformen sichtbar gemacht und ausgewertet (Einströmwinkel, Wirbelmuster).

In dem Prinzipmodell wurden später die Richtungskomponenten der Geschwindigkeit im Bühnenfeld und in der angrenzenden Hauptströmung hauptsächlich für umströmte Bühnen in einem Messraster (Rasterweite: Modell 2 bis 4 cm, Natur 7,3 bis 14,6 m) mittels Laser-Doppler- und Hitzdraht-Anemometrie (LDA und HDA) gemessen. Darüber hinaus wurden Drücke im Hauptstrom (analog zum Wasserstand) und an den Bühnen gemessen. Letztere Messung sollen Aufschluss über die unterschiedliche Bauwerksbelastung geben, wurden aber noch nicht ausgewertet.

In 2008 wurden Untersuchungen mit unterschiedlich angeordneten Bühnenkerben verschiedener Größe bei umströmten Bühnen durchgeführt und ausgewertet ([3], siehe Bild 1 und Bild 2).

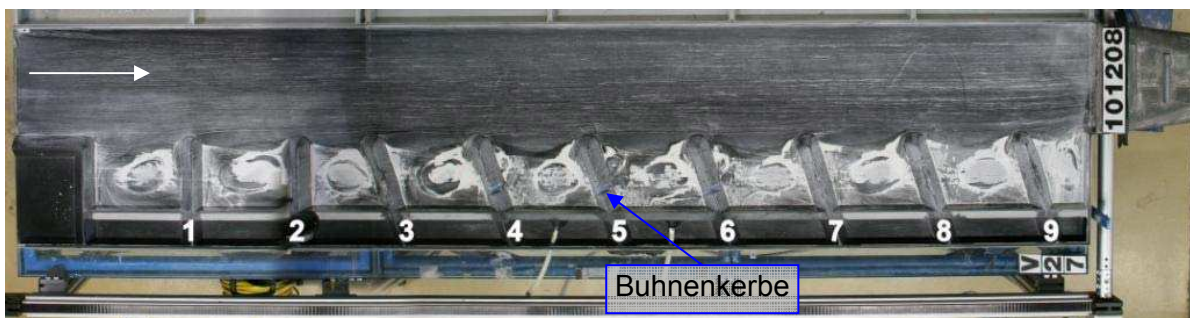


Bild 1: Ergebnis der Visualisierung einer Variante mit kleinster Kerbengröße in drei aufeinander folgenden Bühnen

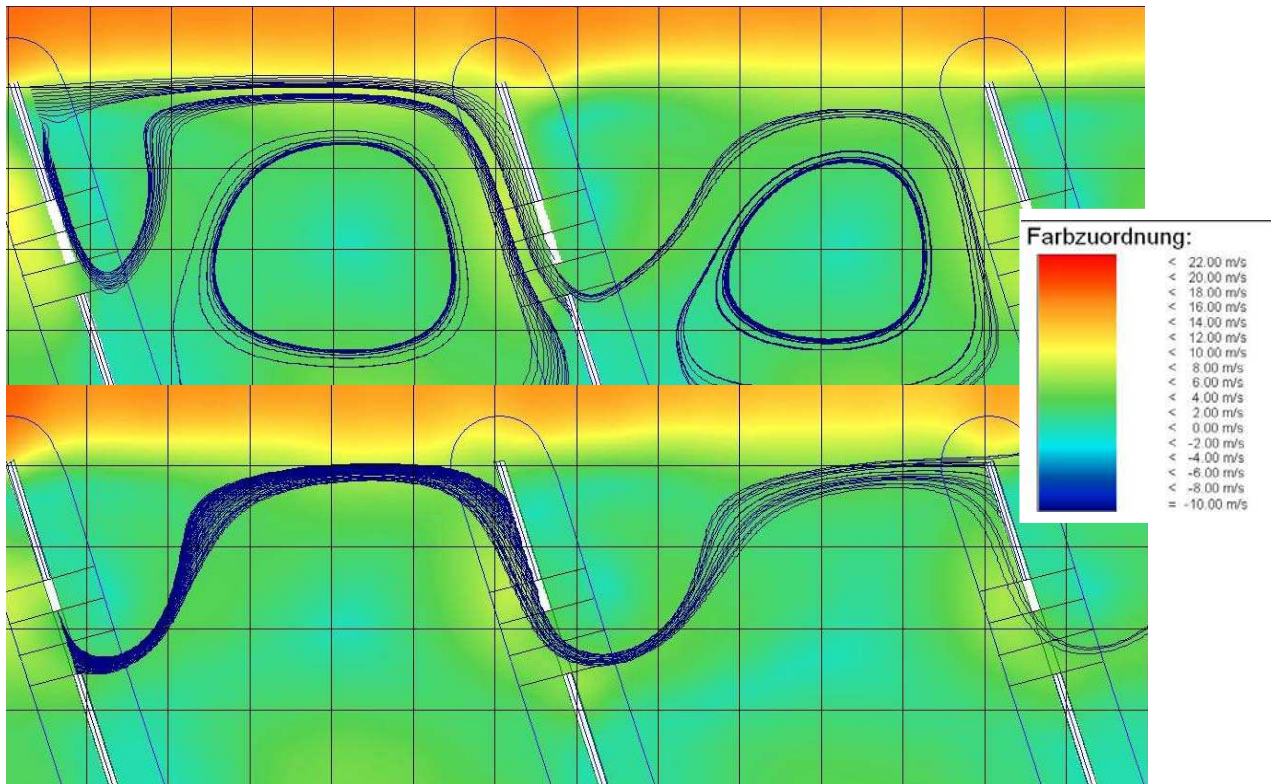


Bild 2: Bahnlinien der Geschwindigkeit in Wasserspiegelhöhe für zwei Kerbenvarianten

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Im Jahr 2009 wurde das Luftlabor der BAW aufgelöst, das FuE-Vorhaben wurde abgeschlossen. Die Auswertungen der vorliegenden Untersuchungsergebnisse erfolgt neben der Projektbearbeitung auch nach Beendigung des Forschungsprojektes, da die Ergebnisse in Untersuchungen zur Wirkung von flussbaulichen Regelungssystemen einfließen.

#### 5 Literatur

- [1] Faulhaber, P. (2007) Neue Methoden der aerodynamischen Modellierung flussbaulicher Fragestellungen. In: Mitteilungsheft Nr. 90 der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- [2] BAW (2009) Unfallbereich Mühlhamer Schleife. Aerodynamisches Modell Do-km 2268,6 bis 2265,5, Langfassung des unveröffentlichten Gutachtens der Bundesanstalt für Wasserbau – 30210114.02, Karlsruhe (in Vorbereitung)
- [3] Kipsch, F. (2009) Untersuchungen am aerodynamischen Prinzipmodell zu Kerben in umströmten Bühnen, unveröffentlichter Praktikumsbericht der Ruhruniversität Bochum, Praktikum in der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe (in Vorbereitung)



## **Modellierung der Wechselwirkung von strömendem Fluid und darin bewegten Körpern**

**Netzplan-Nr.:** A39530310112

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

**E-Mail:** carsten.thorenz@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

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

Die Wechselwirkung zwischen bewegtem Fluid und bewegten Festkörpern kann auf verschiedene Arten betrachtet werden.

Im einfachsten (monodirektionalen) Fall wird ein Körper in einem Fluid bewegt, das Fluid muss sich in seiner Bewegung dem Körper anpassen. Dieser Fall wird beispielsweise bei einem bewegten Schütz einer Schleuse oder auch einem Schleusentor relevant sein. Als Ergebnisgröße wird hierbei die Ermittlung der zur Bewegung nötigen Kräfte und Momente erwartet.

Für den komplexeren bidirektionalen Fall wird eine vollständig gekoppelte Bewegung des Körpers und des Fluids betrachtet, d.h. der Körper bewegt sich im Fluid und wird durch das Fluid bewegt. Dieser Fall beschreibt beispielsweise ein schwimmendes Schiff. Wenn für diesen Körper die möglichen Bewegungsfreiheitsgrade eingeschränkt werden, lassen sich die auf den Körper wirkenden Kräfte bestimmen (bspw. für die Ermittlung der Haltekräfte in einer Schleuse).

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Weiterentwicklungen sollen es erlauben, komplexe Strömungsvorgänge auch dann mit numerischen Modellverfahren abbilden zu können, wenn sich die Geometrie im Laufe der Simulation verändert. Dies ist in der BAW bisher nur im Labormodell oder mit dem numerischen Verfahren Comet (vom Hersteller nicht mehr gepflegt) mit vertretbarem Aufwand möglich. Für die WSV ergibt sich damit der Vorteil, dass die BAW bei erfolgreichem Abschluss des Vorhabens leichter und schneller diese Fragestellungen beantworten kann.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Es soll die Möglichkeit geschaffen werden, mit numerischen Methoden die gekoppelte Bewegung von Fluiden und Festkörpern (bspw. das Schleusen eines Schiffes) in den für die WSV maßgeblichen Größenskalen bearbeiten zu können.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Es sollten folgende Untersuchungsmethoden angewandt werden:

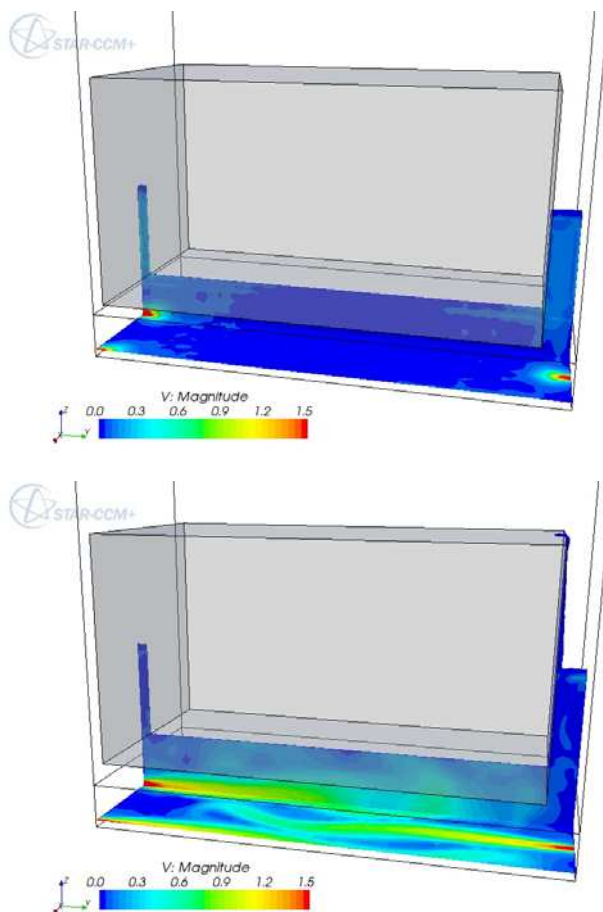
- Literaturrecherche (beendet)
- Weiterentwicklung der in NaSt3DGPF implementierten numerischen Verfahren in Bezug auf ihre Effizienz (beendet)
- Überprüfung und Implementierung verschiedener numerischer Verfahren zur Berücksichtigung bewegter Körper in NaSt3DGPF (beendet)
- Evaluierung weiterer numerischer Verfahren (OpenFoam, StarCCM+) in Bezug auf ihre Tauglichkeit (beendet)

Alle Entwicklungen und Berechnungen sollen auf der Basis der vom VBC3 betreuten numerischen Verfahren durchgeführt werden.

### 3 Ergebnisse

Mit den Methoden in NaSt3DGPF konnten erste Erfolge erzielt werden, aber Stabilität und Geschwindigkeit der numerischen Verfahren waren bisher nicht zufriedenstellend. Daher wurden weitere Versuche mit anderen Verfahren unternommen.

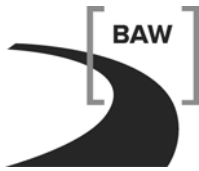
Auf Basis des kommerziellen Verfahrens StarCCM+ wurden verschiedene Varianten der Behandlung bewegter Körper auf ihre Tauglichkeit bezüglich der relevanten Fragen untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Betrachtung von WSV-typischen Problemen eine Sonderstellung einnimmt. Die geringen Abstände der bewegten Körper zueinander führen durch das Scheren der Berechnungsgitter schnell zu Problemen mit der Qualität der Berechnungsgitter und damit der Stabilität der Verfahren.



*Bild 1: Simulationsergebnisse für das Heben eines Schiffsrumpfes (grauer Block) in einer Schleusenammer*

Dies konnte durch selbstgeschriebene Skriptfunktionen abgefangen werden, die in Abhängigkeit von der Gitterqualität eine gezielte Neuvernetzung des Rechengebietes auslösen. Die mit diesem Ansatz durchgeführten Modellrechnungen zeigen ein realistisches Verhalten (s. Bild 1, Prinzipmodell Schiff in Schleuse, Ausschnitt in Längsrichtung), jedoch ein so ungünstiges Laufzeitverhalten, dass er für den Praxiseinsatz nicht geeignet erscheint.

Parallel wurde das frei verfügbare Verfahren OpenFOAM in den Wirkbetrieb in der BAW überführt. Dieses als Open-Source verfügbare Verfahren wird derzeit verstärkt an verschiedenen Universitäten eingesetzt und soll zukünftig in Kooperation mit verschiedenen Partnern eingesetzt werden. Dieses Verfahren beinhaltet verschiedene Ansätze zur Behandlung bewegter Körper, die im Rahmen der Tätigkeiten des VBC3 weiter betrachtet werden.



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

Das FuE-Vorhaben wurde in 2009 abgeschlossen.

**Nautische Sohle im Schlick****Netzplan-Nr.:** A39550110128**Projektleiter:** Dipl.-Ing. F. Liebetruh, Dipl.-Ing. F. P. Eißfeldt, Abteilung Geotechnik, Referat Geotechnik Nord (K1)**E-Mail:** frank.liebetruh@baw.de**1 Problemstellung und Ziel**

In den Wasserstraßen ist die schiffbare Tiefe vorzuhalten. Die Problembereiche stellen die Fahrrinnen dar, an deren Gewässersohle Schlick sedimentiert. Die mechanischen Eigenschaften sind von seiner Zusammensetzung, seinem Alter und vor allem der Mächtigkeit und dem Sandgehalt abhängig. Seine Festigkeit und Viskosität nimmt mit der Tiefe zu. In der Sedimentsuspension (fluid mud) ist im flüssigen Zustand eine sichere Durchfahrt und Steuerbarkeit von Schiffen noch möglich. Mit zunehmender Festigkeit bzw. Viskosität muss der Schlick jedoch gebaggert werden, um die Leichtigkeit und Sicherheit des Schiffsverkehrs auf den Wasserstraßen sicher zu stellen. Um ein Kriterium für die sichere Durchfahrt und Steuerbarkeit von Schiffen im Schlick und dem Erfordernis für Unterhaltungsbaggerungen zu erzielen, wurde die Definition der Nautischen Sohle eingeführt.

Die Nautische Sohle ist als derjenige Horizont definiert, von dem ab die physikalischen Eigenschaften des Bodens einen kritischen Grenzwert erreichen, jenseits dessen eine Grundberührung des Schiffskiels entweder Schäden am Schiff oder nicht mehr tolerierbare Wirkungen auf die Steuerbarkeit und Manövrierfähigkeit verursachen. Dies gilt insbesondere für Wasserstraßen, auf denen Schiffe mit eigenem Antrieb Schiffsgeschwindigkeiten von mehr als 5 Knoten fahren. Das Ziel der Untersuchungen ist es, die Entwicklung verbesserter Verfahren zur Bestimmung der Nautischen Sohle zu begleiten und die Grenzwerte für die Nautische Sohle weiter zu optimieren.

**2 Untersuchungsmethoden**

Der internationale Stand des technischen Wissens zur Nautischen Sohle ist in dem Schlussbericht der gemeinsamen PIANC-IAPH Arbeitsgruppe II-30 von 1997 zusammengefasst. Im Abschnitt 6.5.4 sind Empfehlungen zu den Ausbautiefen in Schlickgebieten angegeben und Kriterien für ihre Bestimmung beschrieben. Neben der Echolotung als flächige Detektionsmethode werden rheologische und dichtebezogene Messungen als punktuelle Verfahren genannt.

Zur messtechnischen Erfassung der Nautischen Sohle werden in der WSV Zweifrequenz-Echolotverfahren eingesetzt, die die Fahrwassersohle in mehreren Profillfahrten aufnehmen. Zur Kalibrierung dieser Echolotverfahren stehen punktuelle tiefenprofilierende geotechnische und rheologische Untersuchungsverfahren zur Verfügung. Sowohl die Echolotverfahren als auch die rheologischen und geotechnischen Untersuchungen sind im Hinblick auf die Nautische Sohle weiter zu entwickeln.

**3 Ergebnisse**

Für die Praxis liegen nachfolgende Erfahrungen vor, die allerdings revierspezifisch anzupassen sind:

Der Übergang von Wasser zur Sedimentsuspension wird durch die hohe Frequenz (im Bild 1 beispielsweise 210 kHz), die Feuchtdichte von  $\rho = 1,02 \text{ g/cm}^3$  und durch die Viskosität von  $\eta = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  beschrieben. Die Nautische Sohle wird abhängig von der Kornzusammensetzung des Schlicks (insbesondere dem Sandgehalt) und der undränierten Scherfestigkeit durch eine revierspezifische Grenzdichte (im Bild 1 beispielhaft  $\rho = 1,20 \text{ g/cm}^3$ ) und revierunabhängig durch eine Viskosität von  $\eta = 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  definiert. Die niedrige Frequenz (im Bild 1 beispielhaft 33 kHz) gibt die Schichtgrenze vom Schlickboden (Weichsediment) zur festen Sohle an.

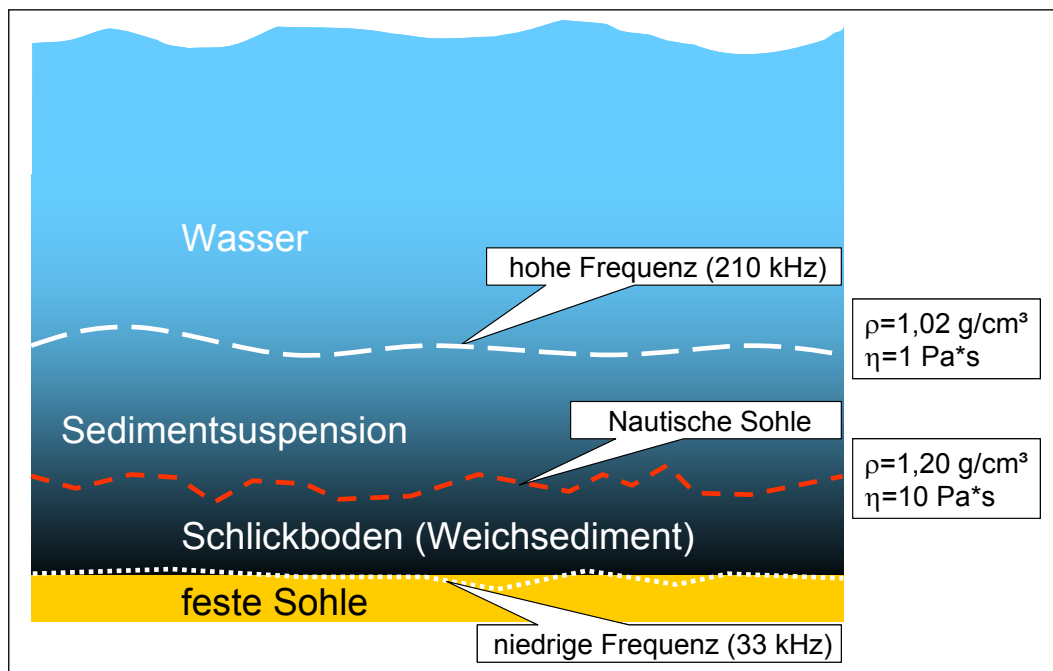


Bild 1: Definitionen zur Nautischen Sohle aus geotechnischer Sicht

In der Unterems wurden in 2003 vergleichende Untersuchungen mit neu am Markt angebotenen Messverfahren zur Detektion der Schlickhorizonte durchgeführt. Für den altersbedingt zu ersetzenden amtsseitigen Navitracker war ein verbessertes Peilverfahren nach neustem Stand der Technik notwendig. Die Vergleichsuntersuchungen führten zu dem Ergebnis, dass das linienförmige Verfahren der Fa. General Acoustics und das kombinierte Messverfahren aus punktueller und linienförmiger Messung der Fa. STEMA die geeignetsten Verfahren im Emsrevier sind. Die Ergebnisse wurden in unserem Gutachten vom März 2004 beschrieben und beim WSA Emden in einer Präsentation vorgestellt. Die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchungen wurden außerdem am 7. Dezember 2004 auf dem gemeinsamen Workshop der Hafentechnischen und Deutschen Hydrographischen Gesellschaft vorgestellt.

Die Messgeräte und die Software des Detektionsverfahrens der Fa. STEMA wurden beim WSA Emden in 2005 beschafft. In 2005 und 2006 konnte mit diesem Detektionsverfahren der Baggereinsatz weiter optimiert werden.

In 2004 wurde die Viskosität von Schlick zu verschiedenen Zeitpunkten (Frühjahr, Sommer, Herbst und Winter) bei unterschiedlichen Biomassenanteilen untersucht. Der biologische Einfluss auf die Sedimentkonsistenz ist zwar messbar, jedoch ohne nennenswerten Einfluss auf die Eigenschaften des Schlicks im Hinblick auf die Nautische Sohle (siehe Abschlussbericht zur Bestimmung der Viskosität von Schlick im Schleusenhafen von Brunsbüttel bei unterschiedlichen Biomassenanteilen, aufgestellt vom Ing.-büro Dr. Greiser und Partner am 5. November 2004).

In den Wasserstraßen und Vorhäfen sind in der Regel unterschiedliche Sandgehalte im Schlick vorhanden. Zunehmender Sandgehalt erhöht die Dichte, die undrainede Scherfestigkeit und Viskosität im Schlick und ist somit von besonderem Interesse für die Festlegung der Nautischen Sohle. Sandfreie bzw. -arme Schlicker – wie im Emdener Fahrwasser – zeigen geringere Festigkeitsentwicklungen infolge Eigenkonsolidation und sind daher im Hinblick auf die Nautische Sohle günstiger zu beurteilen. Im Rahmen der Nassbaggerarbeiten in den Vorhäfen der Schleuse Brunsbüttel wurden zu verschiedenen Zeitpunkten von 2002 bis 2006 systematisch an repräsentativen Schlickproben die Sandgehalte untersucht. Die Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, dass abhängig von wasserbaulichen Randbedingungen (z. B. Strömungs-, Abflussbedingungen, Turbulenzen infolge Schifffahrt), Sandan-

teile zwischen 5 % und 20 % vorhanden sind, die teilweise sogar bis zu 40 % betragen können. Demnach kann in diesem Revier auf Baggerungen nicht verzichtet werden.

Die Festlegung der Nautischen Sohle ist von 3 wesentlichen Faktoren abhängig. Die hydrodynamischen Einflüsse aus der Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße erfordern aufgrund der rasanten Entwicklung in der Containerschiffahrt (Schiffsformen, -geschwindigkeiten, Antriebe) die weitere Forschung des fahrdynamischen Verhaltens bei Revierfahrt (Squat, Trimm, Krängung...) in den Wasserbaureferaten. Die nautischen Belange zur Beurteilung der Steuer- und Manövrierbarkeit eines Schiffes sind von den Nautikern zu beantworten. Die Festlegung der Nautischen Sohle aus geotechnischer Sicht ist von den geotechnischen und rheologischen Eigenschaften im Schlick (fluid mud) abhängig. Die bisher festgelegten Grenzwerte wurden bei den Fahrversuchen in der Moderortrinne bestätigt. Der Schlick wurde sogar unterhalb der festgelegten Grenzwerte durchfahren. Eine weitere Optimierung der Grenzwerte ist daher möglich. Dafür sind Fahrversuche (in situ und im Labor) in verschiedenen Schlickhorizonten durchzuführen und durch Probenentnahmen und Laborversuche zu begleiten. Der zeitliche Umfang und die Termine sind noch nicht festgelegt.

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

Es war vorgesehen, das beim WSA Emden für die Ems eingeführte Detektionsverfahren der Fa. STEMA in anderen Schlickrevieren wie z. B. Vorhäfen Brunsbüttel einzusetzen. Diese Messungen sollten durch Probenentnahmen und Laborversuche begleitet werden. Ebenfalls war vorgesehen, diese Untersuchungen im unterwasserseitigen Vorhafen der Schleuse Herbrum in Verbindung mit alternativen Echolotverfahren durchzuführen.

Wegen fehlender Kapazitäten in den Wasser- und Schifffahrtsämtern und z. T. fehlender Schlickvorkommen an den geplanten Messterminen wurden die Messungen und Untersuchen mehrfach verschoben und bisher nicht durchgeführt. Deshalb erfolgten im Jahr 2009 keine Arbeiten im Rahmen des FuE-Projektes.

Da der zeitliche Umfang und feste Termine nicht festgelegt werden können, wird das FuE-Vorhaben mit dem derzeitigen Bearbeitungsstand abgeschlossen.

## **Windstaudstudien und Entwicklung eines operationellen Tideelbe-Modells (OPTTEL)**

### **Teilprojekt OPTTEL-C**

**Netzplan-Nr.:** A39550370134

**Projektleiterin:** Dr. E. Rudolph, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme II (K3)

**E-Mail:** elisabeth.rudolph@baw.de

## **1 Problemstellung und Ziel**

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

Die Elbe, besonders die tidebeeinflusste Unterelbe, ist ein stark frequentierter Schifffahrtsweg. Aufgrund des Tideeinflusses benötigen Schiffe, die von der Nordsee kommend die Elbe nach Hamburg befahren, vorhergesagte Informationen zum aktuellen Wasserstand. Für bestimmte Manöver im Hafen (z. B. Eindocken von Schiffen, Wenden sehr großer Schiffe) sind zusätzlich detaillierte Kenntnisse der tideabhängigen Strömungsverhältnisse wichtig.

Bei extremen Ereignissen wie Sturmfluten, sehr hohen oder auch sehr niedrigen Oberwasserzuflüssen sind räumlich und zeitlich detaillierte Vorhersagen von Wasserstands- und Strömungsverhältnissen besonders wichtig.

Ziel dieses Projektes ist es, eine operationelle Wasserstands- und Strömungsvorhersage für die Tideelbe zwischen Cuxhaven und Bleckede auch bei extremen Wind- und/oder Oberwassersituationen zur Verfügung zu stellen. Bei der Konzeption des Vorhersagesystems aus Atmosphäre, Nordsee und Elbe wird darauf geachtet, dass die standardisierten Schnittstellen unabhängig vom Ästuar und unabhängig vom HN-Modell formuliert sind. Dies soll die Übertragung des Vorhersagesystems auf andere Ästuarie wie Ems oder Jade-Weser erleichtern.

<http://www.planet-erde.de/Members/huenken/BMBF%20Projekte/optel>

Die hydrodynamischen Verhältnisse in der Elbe sind vergleichsweise gut untersucht. So erfolgten die letzten größeren Fahrrinnenanpassungen nach eingehenden wissenschaftlichen Untersuchungen der BAW zu etwaigen Folgen für die Strömungs- und Wasserstandsverhältnisse.

Bei Extremereignissen wie Sturmfluten, hohen Oberwasserzuflüssen aus der Mittel- oder außergewöhnlich niedrigen Wasserständen sind Wasserstands- und Strömungsentwicklung für die operationelle Vorhersage noch nicht ausreichend erforscht.

Zur Zeit werden bei Wasserstandsvorhersagen für die Elbe in Extremsituationen wie Sturmfluten auch empirische Verfahren eingesetzt. Die dabei verwendeten Ansätze werden auf der Grundlage langjähriger Beobachtungen gewonnen. Die Vorhersage der Windstauentwicklung zwischen Cuxhaven und Hamburg ist auch heute noch ein Problem. Alle extremen Sturmfluten der letzten 150 Jahre zeigen, dass Tide- und Windstauwellen stark nichtlinear interagieren, was bei empirischer Betrachtung die Vorhersage im Einzelfall außerordentlich erschweren kann. Bei Veränderungen z. B. in der Fahrrinne, müssen diese Verfahren mit neuen Beobachtungszeitreihen angepasst werden. Hierbei ist der Schwerpunkt die Anpassung der Zeit- und Höhenentwicklung des Wasserstandes in der Elbe. HN-Modelle dagegen können jederzeit z. B. an neue Gegebenheiten in der Topographie der Elbe angepasst werden.

Ein weiteres, noch weitgehend ungelöstes Problem ist die Driftvorhersage von Schadstoffen (z. B. Öl sowie gelöste oder an Partikel gebundene Substanzen) nach Havarien im Mündungstrichter der Elbe, denn die bestehenden Vorhersageverfahren des BSH haben dort eine zu grobe räumliche Auflösung.

Der Einsatz von HN-Modellen entspricht heute bei Untersuchungen von Ästuaren oder Ozeanen dem Stand der Technik. Die Verwendung von HN-Modellen ermöglicht es, den Verlauf von Wasserstand und Strömung in einem Ästuar oder Ozean sowohl für historische Situationen nachzurechnen als auch für die Zukunft vorzuberechnen.

## 1.2 Bedeutung für die WSV

Verbesserte Vorhersagen der Wasserstands- und Strömungsverhältnisse ermöglichen eine optimale Nutzung der vorhandenen Fahrwassertiefen und einer verbesserte Beratung der Schifffahrt. Außerdem ergibt sich aus dieser Verbesserung auch die Möglichkeit, bei Havarien im Bereich der Elbe die Öl- bzw. Schadstoffbekämpfung effizienter zu betreiben.

## 1.3 Untersuchungsziel

Im Rahmen dieses Projektes soll untersucht werden, ob mit heute vorhandenen robusten HN-Modellen und mit heutiger Rechnerleistung eine operationelle Wasserstands- und Strömungsvorhersage für die Elbe auch unter extremen Wind- und/oder Oberwasserbedingungen in verbesserter Qualität möglich ist.

## 2 Untersuchungsmethoden

- Entwicklung einer Schnittstelle zwischen dem Elbmodell der BAW, das auf dem numerischen Code von UnTRIM basiert [1,2], und dem Vorhersagemodell des BSH für die Nordsee [3] zur Bereitstellung der hydrologischen Antriebe am seeseitigen Rand des Elbmodells.
- Entwicklung einer Schnittstelle zwischen dem Elbmodell der BAW und dem Vorhersagemodell COSMO-EU des DWD zur Bereitstellung von meteorologischen Antrieben über dem Elbeästuar
- Implementierung von Korrekturkoeffizienten für die Winddaten aus dem operationellen Wettervorhersagemodell COSMO-EU für den Bereich der Elbe. Diese wurden unter Verwendung des Windatlas -Verfahrens des Risø National Laboratory (<http://www.windatlas.dk/>) vom Teilprojekt OPTEL-B vom DWD erarbeitet

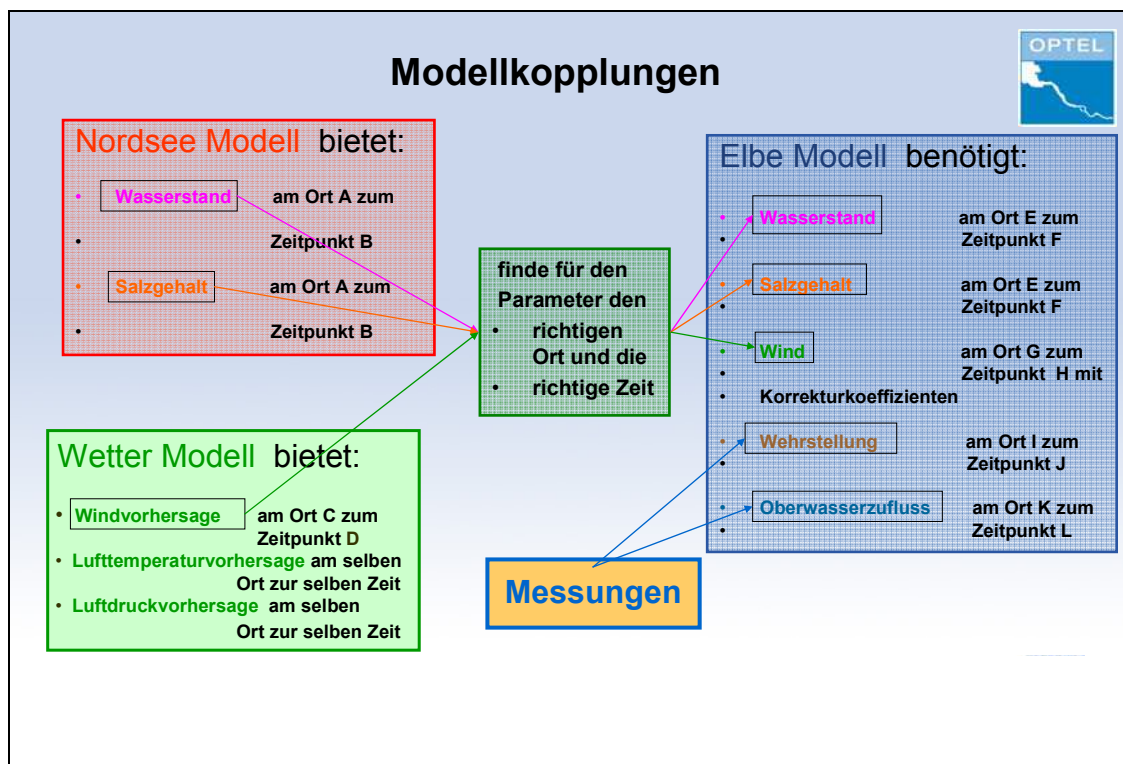


Bild 1: Modellkopplungen

Nach der Kalibrierung des Elbmodells werden 6 verschiedene Szenarien mit den bereitgestellten Vorhersagen gerechnet. Die Szenarien umfassen 2 Sturmfluten, eine Sturmebbe, 2 Zeiträume mit



sehr starker Oberwasserwelle und mittlere Verhältnisse im Ästuar. Die Qualität der Ergebnisse wird anhand verschiedener Tidekennwerte entlang des Ästuars durch den Vergleich mit Beobachtungsdaten bewertet.

### 3 Ergebnisse

Die Schnittstellen zu den beiden anderen Vorhersagemodellen stehen zur Verfügung und wurden ausführlich getestet. Die Randwerte für das Elbmodell konnten damit für alle Szenarien erzeugt werden.

Mit dem Elbmodell wurden bisher mehrere Szenarien gerechnet: unter Verwendung der Korrekturkoeffizienten für den Wind und ohne Korrekturkoeffizienten. Bei niedrigen Windgeschwindigkeiten haben die Korrekturkoeffizienten erwartungsgemäß keinen Einfluss auf den Wasserstand. Bei der Sturmflut 2006 ist der Einfluss der Korrekturkoeffizienten auf den Wasserstand in St. Pauli deutlich sichtbar.

Die Vorhersagen aus dem Nordseemodell zeigen relativ große Abweichungen im Wasserstand im Vergleich zu den Messungen. Deshalb wurden zusätzliche Randwerte am seeseitigen Rand aus Messungen an der Bake Z erzeugt. Diese werden nun für die Kalibrierung verwendet.

Der Vergleich der Modellergebnisse mit den Messungen erfolgt programmgestützt. Das Vergleichsprogramm wurde an das Format der Modellausgabe angepasst und kann damit schon bei der Modellkalibrierung zur Optimierung der Modellparameter verwendet werden.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

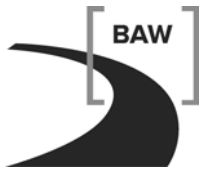
2010: Kalibrierung des Elbmodells, Szenarienrechnungen, Beurteilung der Qualität der Vorhersagen  
Beginn der Einführung des Modellpaketes in den operationellen Betrieb

2011: Abschluss der Einführung des Modellpaketes in den operationellen Betrieb, Abschlussbericht

Bearbeitungszeitraum: bis einschließlich März 2011.

### 5 Literatur

- [1] Casulli, V. and R.A.Walters (2000) An unstructured, three – dimensional model based on the shallow water equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 32, S. 331–348.
- [2] BAW (2004) *Validation document – Mathematical – Model UnTRIM. Bericht*. Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg.  
[http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische\\_verfahren/pdf/Simulationsverfahren\\_Kueste\\_validation\\_document-untrim-2004.pdf](http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/Simulationsverfahren_Kueste_validation_document-untrim-2004.pdf)
- [3] Dick, S., E. Kleine, S. H. Müller-Navarra, H. Klein, H. Komo (2001) The Operational Circulation Model of BSH (BSHcmod) – Model description and validation. *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie* 29, 49 pp.



## **II Laufende FuE-Vorhaben in 2009**

## **Rissbreitenbegrenzende Bewehrung für massige Betonbauteile**

**Netzplan-Nr.:** A39510110124

**Projektleiter:** Dr.-Ing. J. Bödefeld, Abteilung Bautechnik, Referat Massivbau (B1)

**E-Mail:** joerg.boedefeld@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

Maßgebend für die Bewehrungswahl von massigen Betonbauteilen ist im Allgemeinen die Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreiten infolge des Abfließens der Hydratationswärme. Mit dem Merkblatt „Früher Zwang“ der BAW wurde der aktuelle Kenntnisstand auf diesem Gebiet für massige Bauteile zusammengefasst. Dabei wurde Wert auf Pragmatismus und Kalibrierung an Erfahrungen gelegt, so dass die vorgeschlagenen Methoden nicht konsistent sind und besonders für die Problematik Wand auf Sohle weiterer Forschungsbedarf gegeben ist. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, die Haupteinflussfaktoren des Rissbildungsprozesses bei sehr dicken Bauteilen durch Modellrechnungen und Messungen an realistischen Bauteilen quantitativ zu erfassen. Letztendlich ist ein experimentell abgesichertes Ingenieurmodell zur Bemessung der Mindestbewehrung bei sehr dicken Bauteilen zu erarbeiten.

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

Das Problem teilt sich in zwei Fragestellungen. Zum Einen ist die Beanspruchung des Stahlbetonquerschnitts bei frühem Zwang realistisch zu beschreiben. Ist die Ermittlung des sich in der Hydratationsphase ergebenden Temperaturfeldes relativ problemlos, so zeigt bei der Berechnung der daraus resultierenden Spannungen Probleme auf Grund der räumlich und zeitlich veränderlichen Festigkeitsentwicklung. Dabei spielt besonders das im jungen Beton relativ ausgeprägte viskoelastische Verhalten (Kriechen und Relaxation) eine große Bedeutung, was aber aktuell nicht konsistent und realistisch abgebildet werden kann.

Zum Anderen ist die Rissmechanik in dicken Bauteilen von Interesse, da sie sich von dünnen Bauteilen unterscheidet. Der Erfahrung nach ist es nicht erforderlich, die gesamte Zwangskraft mit Bewehrung abzudecken, was bei dünnen Querschnitten zwingend ist. Einen wissenschaftlichen Beleg bzw. eine Quantifizierung für den mit Bewehrung abzudeckenden Anteil gibt es aber nicht.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Stahlbetonbauteile mit Abmessungen von einigen Metern sind bei Verkehrswasserbauwerken die Regel. Ein abgesichertes Ingenieurmodell zur Ermittlung der erforderlichen Bewehrung für frühen Zwang ermöglicht eine wirtschaftliche und sichere Dimensionierung der Bewehrung und führt wahrscheinlich zu einer Vereinfachung der Vorgehensweise im Rahmen der Aufstellung der Entwurfs- und Ausführungsstatik.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel ist es, die Beanspruchung bei frühem Zwang realistisch zu ermitteln und zusammen mit den Erkenntnissen über die Rissmechanik in dicken Bauteilen in ein ingenieurmäßiges Bemessungsmodell zu überführen.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Um die Mechanik der Rissbildung in sehr dicken Bauteilen beschreiben zu können, sind Untersuchungen mit nicht-linearen FEM-Modellen vorgesehen. Das Hauptaugenmerk bei diesen Untersuchungen liegt auf den durch Eigenspannungen beeinflussten Rissbildungsprozess. Dabei kommen Modelle mit diskreter Rissbildung und über Verbund angekoppelten Bewehrungselemente zum Einsatz, da nur so der Ablauf untersucht und die einzelnen Anteile quantitativ erfasst werden können. Relevant ist der Anteil der Eigenspannungen zum Risszeitpunkt, da dieser nicht mit Bewehrung abgedeckt werden muss. Im Ablauf der Rissbildung ist dann interessant, welcher Anteil der Zwangskraft bei

dicken Querschnitten von der konzentriert am Rand angeordneten Bewehrung aufzunehmen ist. Letztendlich interessiert noch die Wechselwirkung zwischen der Bildung von primären Rissen, die mehr oder weniger durch die kontinuierliche Zwangskrafteinleitung bestimmt sind, und sekundären Rissen in der Randzone. Da die sekundären Risse einen Beitrag zur bei Zwang relevanten Verformungskompatibilität leisten, reduzieren sie die Beanspruchung in der Bewehrung weiter.

Zur Verifizierung der Materialgesetze wurde die sich im Bau befindliche Schleuse Sülfeld mit Messaufnehmern versehen (Temperatur, Dehnungen, Spannungen). Parallel werden die Bauabschnitte zur Zeit bei der Uni Leipzig mit 3D-FEM-Modellen nachgerechnet. Ein erster Bericht über die Messungen in der Schleusenkammersohle liegt vor, ein zweiter Bericht über die Messungen in den Kammerwandabschnitten befindet sich in der Erstellung.

### 3 Ergebnisse

Bei der Dimensionierung der Mindestbewehrung zur Beschränkung der Rissbreite wird in nationalen und internationalen Massivbaunormen angenommen, dass die zum Risszeitpunkt im Beton wirkende Zwangskraft zu einem Teil von der Bewehrung aufgenommen werden muss und anschließend die Zwangsbeanspruchung durch die Rissbildung vernachlässigt werden kann. Der Anteil der Betonzwangskraft, die von der Bewehrung aufgenommen werden muss, wird durch den Faktor  $k$  gesteuert, der mit der Bauteildicke zunimmt, aber bereits ab einer Bauteildicke von 80 cm mit  $k = \text{const.} = 0,5$  angesetzt wird. Es kann gezeigt werden, dass der Anteil der Eigenspannungen zum Risszeitpunkt sehr stark von der wirkenden Behinderung abhängt, da die Behinderung den Risszeitpunkt steuert und sich der Eigenspannungsverlauf während der Hydratationsphase stark ändert. Ohne genauere, aufwendige Berechnung im Einzelfall kann der Faktor  $k$  nicht vorhergesagt werden.

Darüber hinaus kann gezeigt werden, dass die Bewehrung auf Grund der konzentrierten Anordnung am Bauteilrand nur einen Teil der Betonzwangskraft aufnimmt, siehe Bild 1. Der Anteil bewegt sich in der Größenordnung von 20% und nimmt mit der Dicke ab, bzw. die Zwangskraft in der Bewehrung nach der Rissbildung ist ab einer bestimmten Bauteildicke konstant.

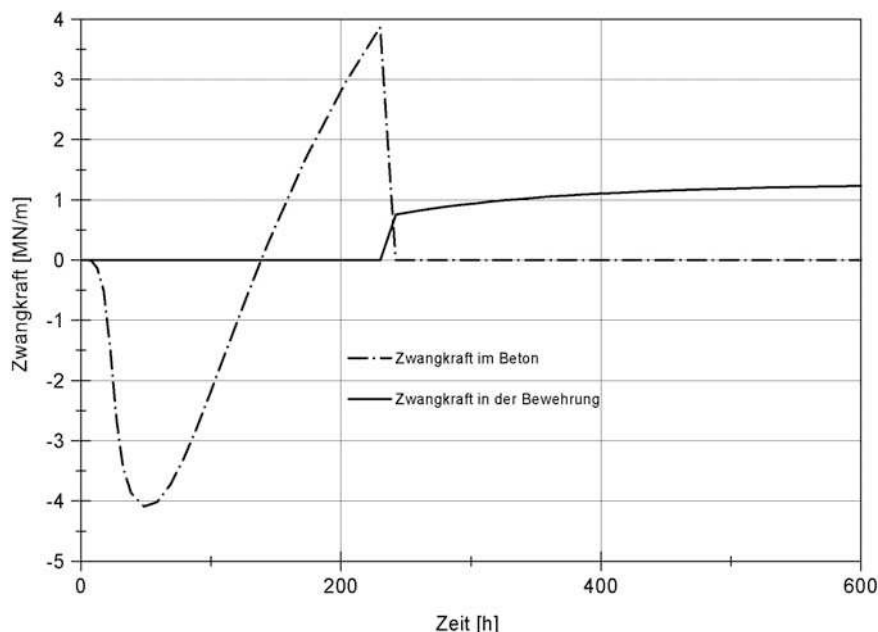


Bild 1: Übergang der Zwangskraft von Beton in Bewehrung bei Rissbildung

Weiterhin zeigen die Untersuchungen aber, dass die Rissbildung einen weiteren Anstieg der Zwangsbeanspruchung nicht verhindern kann. Vielmehr steigt die Zwangskraft in der Bewehrung bis zum Temperaturengleich weiter kontinuierlich an. Die Zugfestigkeit zum Risszeitpunkt ist dann aber uninteressant, da sie nur den Zeitpunkt angibt, an dem die Zwangskraft vom Beton in die Bewehrung übergeht. Die Zwangskraft in der Bewehrung bei Temperaturengleich ist dem gegenüber nur von der ab

dem zweiten Nullspannungszeitpunkt wirkenden Temperaturdifferenz abhängig und dabei nur von dem zentrischen Zwang erzeugenden Temperaturanteil.

Auswertungen über verschiedene Betonrezepturen und Randbedingungen zeigen dabei, dass diese Temperaturdifferenz relativ konstant ist und zwischen 15 und 20 K liegt. Sie ist damit deutlich kleiner als die adiabatische Temperaturerhöhung.

Da der sich einstellende Rissabstand allein von den geometrischen Verhältnissen des zwängenden zum gezwängten Bauteil abhängig ist, kann für baupraktische Verhältnisse ein maximaler Rissabstand vorgegeben werden. Damit kann zusammen mit der Temperaturdifferenz die im Falle der freien Verformung auftretende Verkürzung ermittelt werden. Die durch die vorgegebene Primärrissbreite (z. B.  $w_k = 0,25 \text{ mm}$ ) zugelassene Verformung kann davon abgezogen werden, die restliche Verformung muss aus Gründen der Kompatibilität durch Sekundärrissbildung aufgenommen werden.

Durch rechnerische Analysen kann sowohl das Verhältnis der Rissbreiten untereinander zur Ermittlung der erforderlichen Anzahl an Sekundärrissen für die Verformungskompatibilität als auch die erforderliche Spannung im Primärriss zur Erzeugung einer bestimmten Anzahl von Sekundärrissen bestimmt werden, womit das Problem gelöst ist, siehe Bild 2.

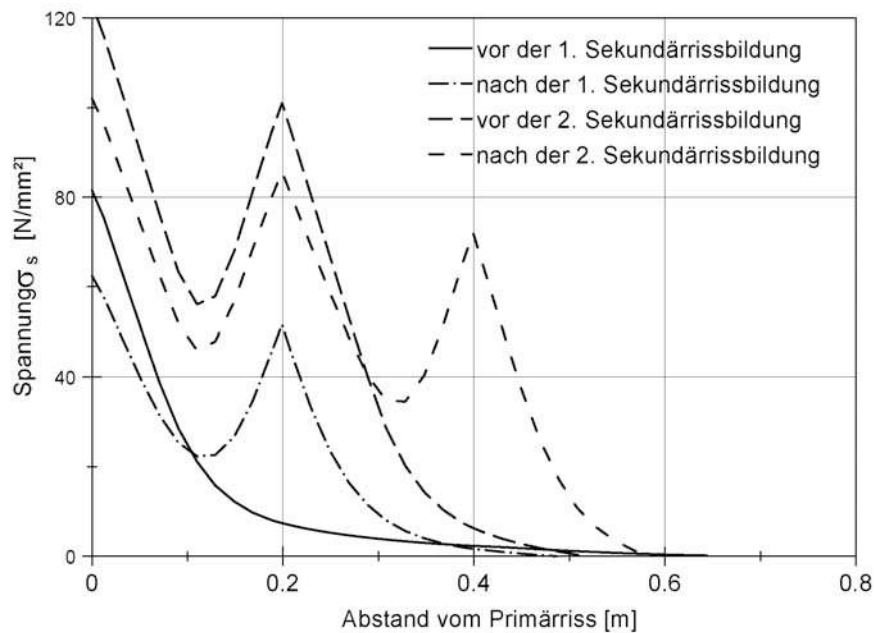


Bild 2: Spannungsverteilung bei zunehmender Sekundärrissbildung

#### 4 Zukünftiges Arbeitsprogramm

2010: Bestimmung der signifikanten Parameter, Überarbeitung des Merkblatts Früher Zwang, Abschluss des FuE-Projektes

## **Entwicklung eines Erhaltungsmanagementsystems für die WSV (EMS-WSV) auf der Basis der Ergebnisse der Bauwerksprüfung**

**Netzplan-Nr.:** A39510010139

**Projektleiter:** Dr.-Ing. J. Bödefeld, Abteilung Bautechnik, Referat Massivbau (B 1)

**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 international Systeme existieren, gibt es für Verkehrswasserbauwerke kein Verfahren. Nach Überprüfung und Anpassung können aber unterschiedliche Elemente der Brückenmanagement-Systeme übernommen werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Altersstruktur der Verkehrswasserbauwerke in der WSV wird immer ungünstiger. Bei Schleusen sind mehr als 35 % der Bauwerke schon älter als 80 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 (BMVBS, Koordinatoren für die Bauwerksinspektion, Bauwerksprüfer und alle Fachreferate der Abteilung Bautechnik der BAW Karlsruhe). Koordiniert wird diese durch die Fachgruppe Erhaltungsmanagementsystem der Abteilung Bautechnik in der BAW.

Die Bearbeitung erfolgt phasenweise. Die erste Phase mit intensiver Literatur- und Internetrecherche sowie der Analyse und ggf. Überarbeitung der vorhandenen Basis wurde bereits abgeschlossen. 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.

### **3 Ergebnisse**

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

Zu den qualitätssteigernden Maßnahmen für die Bauwerksinspektion gehörten vorrangig:

- Festlegung der Inspektionsvorschriften für die unterschiedlichen Objektarten
- Erarbeitung und Durchführung eines Schulungskonzeptes für die WSV
- Erstellung von Musterbauteilgliederungen für Schleusen, Wehre, Düker und Kanalbrücken
- Musteraufgabenblätter für WSVPruf
- Erarbeitung eines Merkblattes „Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV)“, das seit Frühjahr 2007 in gedruckter Fassung zur Verfügung steht und ab Frühjahr 2008 als Online-Hilfe in WSVPruf integriert ist. Mit der damit verbundenen Verbesserung und Homogenisierung der Schadenseinstufung bei der Bauwerksinspektion ist eine fundamentale Grundlage für ein Erhaltungsmanagementsystem erreicht.

Die Maßnahmen wurden zwischenzeitlich im Rahmen einer Überarbeitung in die VV-WSV 2101 integriert. Der WSV wurden die Maßnahmen im Rahmen von Schulungen (100 Prüfer der WSV), durch einen Workshop für SBL-2 und einen zentralen Aussprachetag Bauwerksinspektion vermittelt.

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. Die Markov-Ketten sind aufgrund ihrer Flexibilität sehr gut geeignet, das Fortschreiten von begonnenen Schadensprozessen unterschiedlichster Art zu beschreiben. Das adaptierte Verfahren der Bevölkerungsstatistik ist demgegenüber geeignet, auf aggregierter Ebene den Lebenszyklus von ungeschädigten Bauteilgruppen zu erfassen. Gemeinsam fügen sich die Verfahren damit sinnvoll in ein EMS für Verkehrswasserbauwerke ein.

Für beide Verfahren sind spezifische Eingangsparameter erforderlich. Da eine zielführende Kalibrierung der Prognosemodelle auf Basis von Realdaten erst mit einem umfassenden Datenbestand möglich ist, wurde eine Expertenbefragung geplant. Sie dient als ersten Einstieg in eine Zustandsprognose und wird zukünftig mit Realdaten verglichen und angepasst.

Die Expertenbefragung wurde nach den Grundsätzen der Delphi-Methode durchgeführt. Sie ist ein Verfahren zur Aktivierung von Expertenwissen, was durch einen stark strukturierten, schriftlichen, anonymisierten Gruppenkommunikationsprozess unter Experten erreicht wird.

In das Expertengremium für die im Sommer durchgeführte Delphi-Befragung waren alle Ingenieure der Abteilung Bautechnik berufen. Zusätzlich konnten weitere 7 Experten (Bauwerksprüfer) aus der WSV für die Arbeit gewonnen werden.

Insgesamt wurden 14 Themenblöcke abgefragt. Die Aufgabe bestand darin, Zeiträume anzugeben, wann ein bestimmter Schädigungsprozess in eine bestimmte Schadensklasse eintritt. Dabei wurden anfällige, mittlere und robuste Bauwerke unterschieden. Der Fragebogen bestand grundsätzlich aus standardisierten Antwortvorgaben, um den Auswertungsaufwand zu reduzieren, leichter zu statistisch fundierten Aussagen zu gelangen und den Zeitaufwand der Experten zu verringern.

Aus den Antworten konnten sowohl die Parameter für die Überlebensfunktionen ermittelt werden als auch die Koeffizienten der Markov-Matrizen für die Verfallsprozesse bestimmt werden.

Beispielberechnungen mit realen WSVPruf-Daten zeigten die generelle Eignung des Verfahrens. In Diskussion mit der WSV wurde auch die Plausibilität der Ergebnisse bestätigt.

Insgesamt ist die in WSVPruf vorhandene Datengrundlage noch nicht zufrieden stellend. Es wurde daher vereinbart, bei den nächsten Schritten die Prognose der ungeschädigten Meta-Kategorien auf Basis der Überlebensfunktionen in den Mittelpunkt zu stellen.

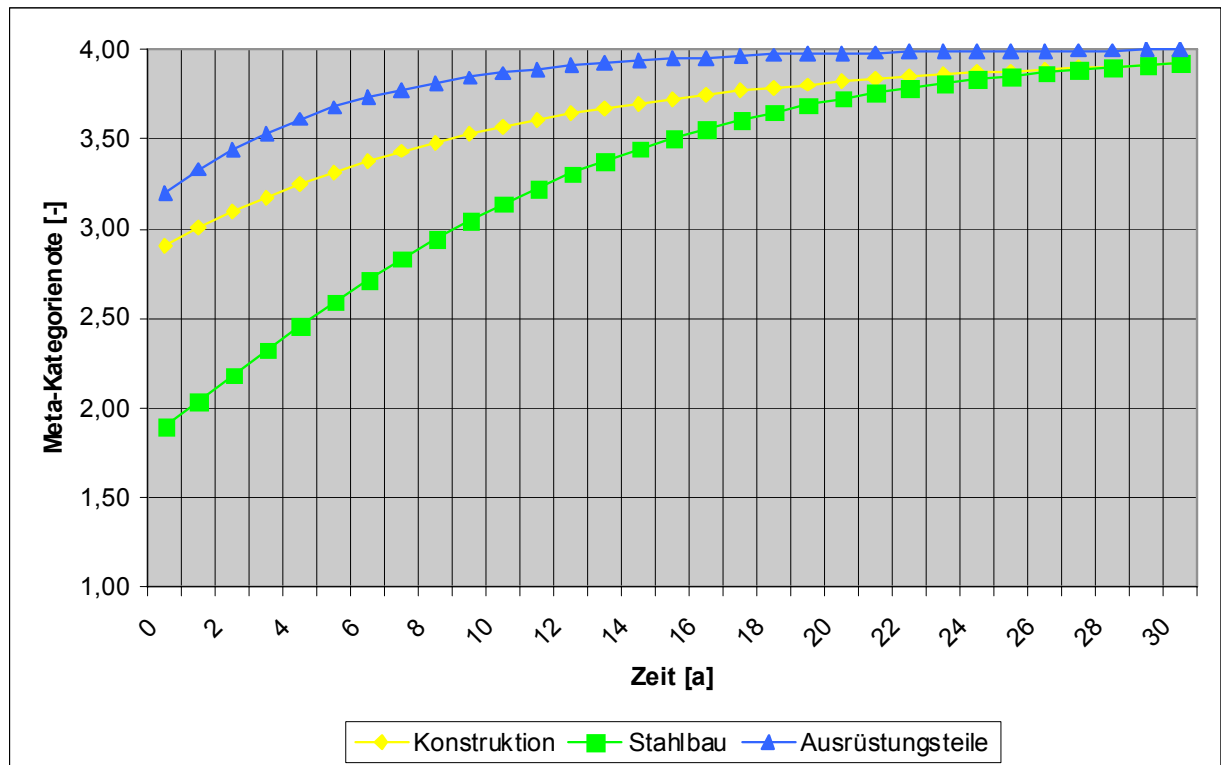


Bild 1: Prognose der drei Meta-Kategorienoten auf Basis der Inspektionsergebnisse

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

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2010:

Integration von weiteren Faktoren, die neben dem Bauwerkszustand die Priorisierung der Instandsetzungsreihung mit beeinflussen

Programmierung eines Tools zu automatisierten Zustandsprognose

Übertragung der Zustandsprognose auf andere Objektarten

Konzept zur Erfassung der Instandsetzungsmaßnahmen und -kosten

2011ff:

Entwicklung von Strategien und Szenarien

IT- Konzeption und Umsetzung

#### 5 Literatur

- [1] Kühni, K., Bödefeld, J., Kunz, C.: EMS-WSV – Ein Erhaltungsmanagementsystem für Verkehrswasserbauwerke, Bautechnik 85 (2008), Heft 8, S. 514- 520



## **Ermittlung Kräfte bei Ankerwurf**

**Netzplan-Nr.:** A395101010178

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. (FH) Holger 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 Lastfall 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. sind 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.

### **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 Anker-

kette 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 FEM-Modellierung die dynamischen Effekte untersucht werden. Evtl. unter zusätzlicher Untersuchung an weiteren FEM-Modellen von Kreuzungsbauwerken erfolgt daraufhin die Entwicklung des Bemessungsansatzes.

### 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.

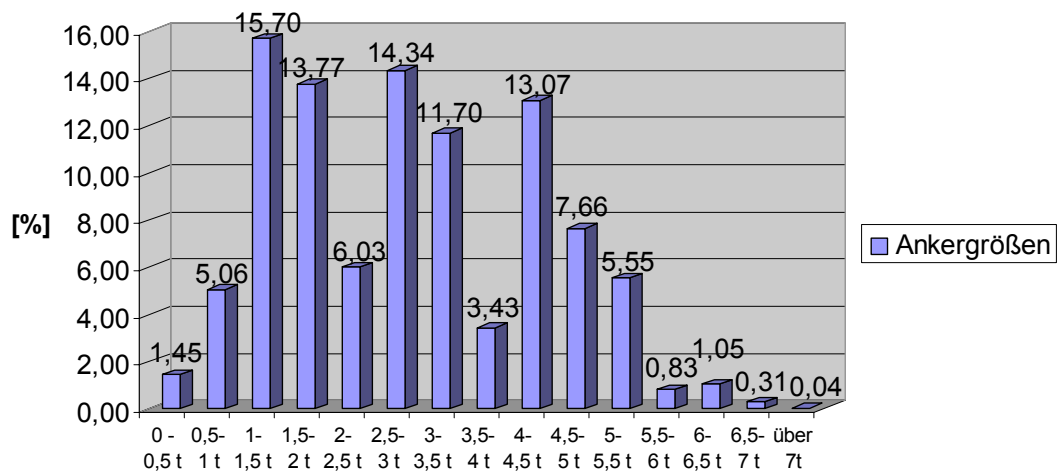


Bild 1: Verteilung der Ankergewichte auf dem NOK in den Jahren 2004 bis 2006 bei Auswertung von rund 45 % der Schiffspassagen

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 [1] zur Bemessung dieser Galeriebauten mündeten, die für eine erste Abschätzung von Lasten aus Ankerwurf herangezogen werden kann.

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.

#### **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 werden augenblicklich Konstruktionen und Querschnitte typischer Kreuzungsbauwerke analysiert und auf FEM-Basis für die weiteren rechnerischen Untersuchungen modelliert. Um einen Abgleich zwischen realer Eindringssituation und rechnerischen Randbedingungen der Modellierung zu erhalten, sind weitere Naturversuche angedacht, bei welchen das reale Eindringverhalten messtechnisch überwacht wird. Das Vorhaben wird voraussichtlich in 2012 abgeschlossen.

#### **5 Literatur**

- [1] Einwirkungen infolge Steinschlags auf Schutzgalerien, Richtlinie herausgegeben vom Bundesamt für Straßen ASTRA, Abteilung Straßennetze, und SBB AG Infrastruktur Ingenieurbau, Ausgabe 2008 V2.01, Bern, 2008

## Ermüdungsfestigkeitsversuche an geschmiedeten Hängeranschlüssen von Stabbogenbrücken

Netzplan-Nr.: A39510110194

Projektleiter/in: Dipl.-Ing. M. Deutscher, Abteilung Bautechnik, Referat Massivbau (B1),  
Dipl.-Ing. U. Gabrys, Abteilung Bautechnik, Referat Stahlbau, Korrosionsschutz (B2)

E-Mail: martin.deutscher@baw.de

### 1 Problemstellung und Ziel

#### 1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Brücken die nicht vorwiegend ruhenden Lasten ausgesetzt sind, müssen gegen Versagen infolge Ermüdung nachgewiesen werden. Dies gilt insbesondere für Hängeranschlüsse an Stabbogenbrücken. Die Ermüdungsfestigkeit ist im Wesentlichen von der inneren und äußeren Kerbwirkung abhängig. Die innere Kerbwirkung stellt sich durch das heterogene Metallgefüge ein. Als äußere Kerbe kann z.B. die Oberflächenrauigkeit, Narben, Schweißnähte und auch Steifigkeitssprünge in der Konstruktion selbst angesehen werden. Überlagert werden diese Spannungen mit den Eigenspannungen aus dem Herstellungsprozess, die in Summe zu mikroskopisch kleinen Plastifizierungszonen führen. Von diesen Stellen aus wird bei häufigen Lastwechseln der Mikroriss initiiert.

In den vergangenen Jahren sind Schäden an geschweißten Hängeranschlüssen aufgetreten, die auf eine nicht ermüdungssichere Konstruktion zurück zu führen sind. Da dieser Anschluss für die Standicherheit der Brücke von besonderer Bedeutung ist, wurde von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) die technische Empfehlung „Hängeranschluss“ [1] erarbeitet. Dort werden für den Neubau geschweißter Hängeranschlüsse Nachweisverfahren und Konstruktionshinweise gegeben. Die Kerbfälle wurden der DIN EN 1993-1-9 entnommen.

Bereits Ende der 90er Jahre wurden geschmiedete Hängeranschlüsse entwickelt, die an der Dehmseebrücke für das *Brandenburgische Autobahnamt* ausgeführt wurden. In der dafür erstellten Stellungnahme der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen wurde festgestellt, dass die geschmiedeten Hängeranschlüsse hinsichtlich der aufnehmbaren Lastwechsel günstigere Werte aufweisen als der Anschluss mit einem eingeschweißten Hängerstab [2, 3]. In dieser Stellungnahme wurde auf Ergebnisse aus Berechnungen mit Finite-Elemente (FE)-Modellen zurückgegriffen. Ermüdungsfestigkeitsversuche wurden bis zu diesem Zeitpunkt nicht durchgeführt.

#### 1.2 Bedeutung für die WSV

Im Bereich der WSV sind bereits auf Grund von Schäden an geschweißten Hängern, Stabbogenbrücken mit geschmiedeten Hängeranschlüssen ausgeführt worden. Dies ist die Hünxer Brücke am Wesel-Dattel-Kanal und die Brücke Maximilian am Datteln-Hamm-Kanal. Neu gebaut wird zur Zeit die Ahse-Brücke, die ebenfalls mit geschmiedeten Hängeranschlüssen ausgebildet wird (siehe Bild 1). Bild 2 zeigt einen eingebauten, geschmiedeten Hänger an der Hünxer Brücke.



Bild 1: Geschmiedeter Hänger der Ahse-Brücke

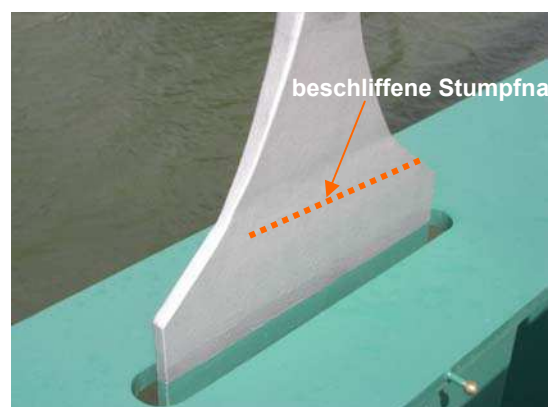


Bild 2: Geschmiedeter Hänger der Hünxer-Brücke

### 1.3 Untersuchungsziel

Nach den bis jetzt vorliegenden Informationen stellt der geschmiedete Hängeranschluss aus technischer Sicht eine zu beachtende Alternative zum geschweißten Anschluss dar. Dies soll durch Ermüdungsfestigkeitsversuche bestätigt werden. Nur durch Versuche ist eine quantitative Einschätzung der Ermüdungssicherheit gegeben. Ziel dieses Vorhabens ist es daher die Ermüdungsfestigkeit von geschmiedeten Hängeranschlüssen durch Versuche zu verifizieren und den Anschluss als Kerbdetail nach DIN EN 1993-1-9 einzustufen. Der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) soll mit der Angabe von Kerbdetails ein Hilfsmittel zur wirtschaftlichen und ermüdungssicheren Ausführung von geschmiedeten Hängeranschlüssen zur Verfügung gestellt werden.

### 2 Untersuchungsmethoden

Die Kerbkategorie eines Kerbdetails wird mit Dauerfestigkeitsversuchen an mindestens 10 Prüfkörpern gewonnen. Die Prüfkörper sollen im Maßstab 1:1 aus S 355 J2 nach vorgegebener Musterzeichnung und nach Schablone hergestellt werden. Die Gesamtlänge des Hängers wird jedoch auf 1,5m beschränkt. Als Stabdurchmesser wird ca. 80mm gewählt. Die mechanisch-technologischen Eigenschaften sollen an einer parallel hergestellten Probe überprüft, mit den mitgelieferten Zeugnissen verglichen und dokumentiert werden. Die Prüfungen sind mit einem Resonanzpulsar durchzuführen, um die Versuchsdauer zu verkürzen. Die Durchführung und Auswertung der Ermüdungsfestigkeitsversuche sollen durch ein externes Institut vorgenommen werden. Vor der Versuchsdurchführung sollen FE-Berechnungen durchgeführt werden, um die Hängeranschlussgeometrie zu optimieren.

### 3 Ergebnisse

In 2007 wurde durch FE-Berechnungen die Hängergeometrie optimiert (Bild 3) und in 2008 die Ausschreibung der Versuche durchgeführt. Unter anderem mussten geeignete Prüfinstitute gefunden werden, da nur sehr wenige Prüfinstitute über für diese Prüfungen erforderlichen Maschinen verfügen. Die Ausschreibung musste jedoch zurückgezogen werden, da erst in 2010 die Versuchskörper zur Verfügung stehen.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

#### 2010

- Ausschreibung und Durchführung der Ermüdungsversuche
- Auswertung der Ergebnisse
- Erarbeitung von Konstruktionsempfehlungen
- Publikation der Ergebnisse

#### 2011

- Bereitstellung der Ergebnisse an den Normenausschuß DIN EN 1993 - 1-9 zur ggfs. Einarbeitung in den Kerbfallkatalog

### 5 Literatur

- [1] TEB Hängeranschluss: Technische Empfehlung der Bundesanstalt für Wasserbau, Abteilung Bautechnik. Konstruktive Empfehlungen und Nachweise zur Ermüdungssicherheit von Hängeranschlüssen, Ausgabe Oktober 2003
- [2] Lehmann Egbert.: Bau von drei Bogenbrücken im Zuge der brandenburgischen Autobahnen. Sonderheft Brandenburgisches Autobahnamt 2000
- [3] Günther, Hortmanns, Schwarzkopf, Sedlacek, Bohmann.: Dauerhafte Ausführung von Hängeranschlüssen an stählernen Bogenbrücken. Heft 11, Stahlbau 69



Bild 3: FE-Berechnung eines geschmiedeten Hängerstabs, Spannungsverteilung

**Empfehlungen zum Pollerzug (Trossenzugansatz) für Binnenschiffsschleusen**

**Netzplan-Nr.:** A39510210106

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

**E-Mail:** wilfried.meinhold@baw.de

**1 Problemstellung und Ziel**

**1.1 Ingenieurtechnische Fragestellung und Stand des Wissens**

Gegenüber dem früheren Regelwerk haben sich mit den Festlegungen in DIN 19703, Ausgabe 11/1995, die auf der Einwirkungsseite anzusetzenden Bemessungswerte für die Poller und ihre Verankerungen deutlich erhöht (vgl. Tabelle 1). Für den Neubau von Schleusen mit den in der Norm aufgeführten Regelabmessungen ist der Grundsatz zu vertreten, dass die vorgegebenen Lastgrößen ohne Einschränkung (d. h. auch bei der Lastweiterleitung ins Massiv- bzw. Spundwandbauwerk) zu berücksichtigen sind. Unrealistisch wäre es jedoch, diese Lasten ohne weitere Differenzierung auch für bestehende, insbesondere ältere und vor allem kleinere Schleusenbauwerke in gleicher Größe zum Ansatz zu bringen.

*Tabelle 1: Pollerbeanspruchungen nach gültiger Ausrüstungsnorm*

| Bauteil     | Charakteristischer Wert der Einwirkungen [kN] | Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_F$ | Bemessungswert der Einwirkungen $S_D$ [kN] | Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_M$ [Beanspruchbarkeit: $R_D = f_{y,k}/\gamma_M$ <sup>*)</sup> |
|-------------|---|-----------------------------------|--|--|
| Poller      | 200   | 1,5                               | <b>300</b>                                 | 1,1  |
| Halteringe  | 100   | 1,5                               | <b>150</b>                                 | 1,1  |
| Verankerung | 300   | 1,5                               | <b>450</b>                                 | 1,1  |

<sup>\*)</sup>  $f_{y,k}$  ... Streckgrenze der gewählten Stahlsorte

**1.2 Bedeutung für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)**

Mit den erarbeiteten Ergebnissen wird sich das Tragverhalten von Pollerkonstruktionen realitätsnah einschätzen und der Umfang evtl. Umrüstungs- bzw. Ertüchtigungsmaßnahmen bei bestehenden Festmachevorrichtungen genauer definieren lassen. Des weiteren können erforderliche Maßnahmen in differenzierter Form vorgenommen werden und es kann ggf. auch auf entsprechende Maßnahmen verzichtet werden.

**1.3 Untersuchungsziel**

Im Rahmen des FuE-Themas sollen Empfehlungen zum Trossenzugansatz erarbeitet werden, die einerseits möglichst wirklichkeitsnah sind (z. B. auch für Festmachevorrichtungen kleinerer Schleusen zutreffen) und andererseits bei ausreichendem Sicherheitsniveau ebenfalls Wirtschaftlichkeitsaspekte berücksichtigen. Ziel der Untersuchungen ist auch eine Neubewertung des mit herkömmlichen Berechnungsmethoden nur unzureichend abbildbaren Tragverhaltens des Systems "Pollerzapfen-Unterkonstruktion".

**2 Untersuchungsmethoden**

Anhand vergleichender Betrachtungen soll im Sinne des Untersuchungsziels festgestellt werden, ob und wie sich die Bemessungswerte zum Trossenzugansatz in Abhängigkeit von der Wasserstraßenklasse bzw. dem System Schiff-Trosse und der Schiffsgrößenverteilung begründbar modifizieren lassen. Grundlage für den Vergleich mit den Festlegungen des aktuellen Regelwerks bildet dabei die Auswertung und Umsetzung entsprechender Fachliteratur, die Ermittlung zutreffender Schiffsgrößenverteilungen und auch das Ergebnis von Zugversuchen.

Für das mit herkömmlichen Berechnungsmethoden nur unzureichend bewertbare Tragverhalten des Koppelsystems "Pollerzapfen-Unterkonstruktion" werden spezielle Untersuchungen mittels FEM vorgenommen, die vor allem auch die differenzierten Zapfeinpassungsformen in den Pollerstuhl berücksichtigen.

### 3 Ergebnisse

Die Beanspruchung eines Pollers (Bild 1) stellt sich in zwei unterschiedlichen Lastfällen dar:

- a) Entstehung von Bremskräften (durch toleriertes Abbremsen des Schiffs am Poller bei Einfahrt in die Schleuse)
- b) Entstehung von Haltekräften (durch füll- bzw. entleerungsbedingte Wasserspiegelneigungen beim Auf- und Abschleusvorgang).

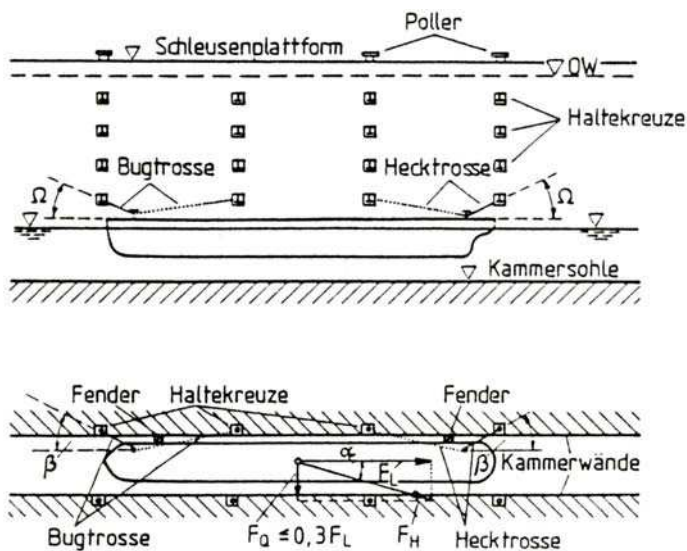


Bild 1: Längs- und Querkräfte auf ein schleusendes Schiff, Kräfte richtungen (Quelle: Partensky, Ausrüstungselemente von Binnenschiffsschleusen)

Der Lastfall a) dürfte immer die größeren Werte liefern und wird insofern für den Trossenzug-Ansatz bei den Pollern maßgebend. Wichtig für die weiteren Überlegungen ist auch, dass die beiden Lastfälle nicht gleichzeitig auftreten und sich hinsichtlich der Lastrichtung unterscheiden.

Typische Situationen beim Festmachen und Lösen der Trossen während eines realen Schleusungsvorgangs sind in Bild 2 dargestellt. Erkennbar ist hier auch der relativ steile Winkel, den die Trosse bezogen auf die Schleusenlängsachse in der horizontalen Lage einnimmt, während sich der Vertikalwinkel deutlich flacher einstellt. Aus den beiden Komponenten entsteht dadurch ein i. d. R. eher in Schleusenlängsachse weisender Kraftvektor (Wirkungsrichtung der Resultierenden), was vom Grundsatz her sowohl auf Haltekräfte als auch auf Bremskräfte zutrifft.



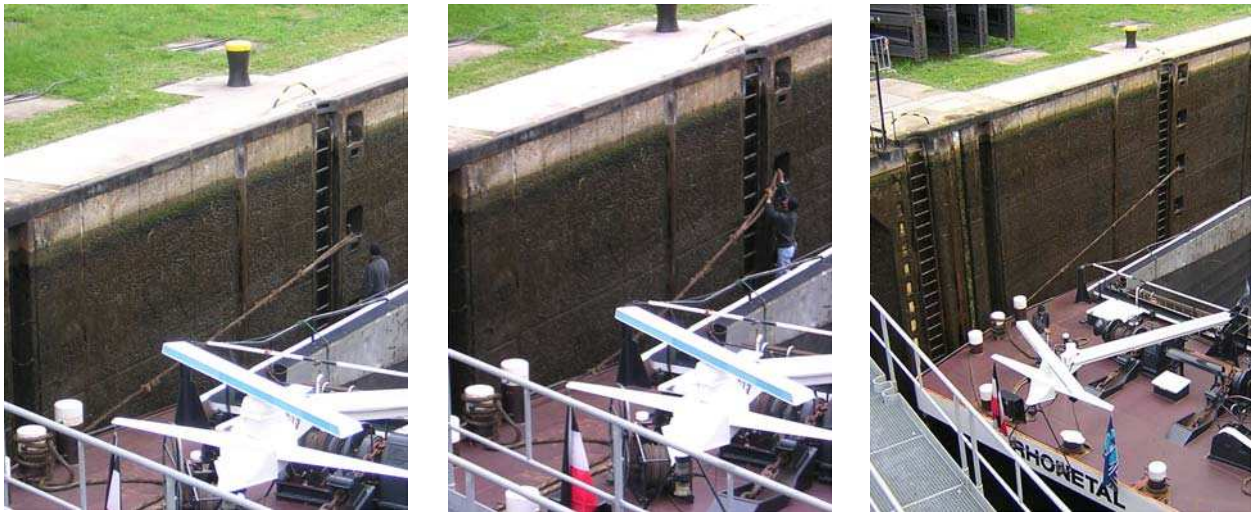


Bild 2a, b und c: Typische Situationen beim Festmachen und Lösen der Trossen an Nischenpollern

Erste Untersuchungsergebnisse lassen erkennen, dass neben den Steifigkeits-Kennwerten der Trosse die Schiffsmasse, Einfahrtsgeschwindigkeit und (wirksame) Trossenlänge die maßgebenden Parameter sind. Unter Berücksichtigung des 95%-Quantilwerts der wasserstraßenbezogenen Schiffsmassenverteilung und der realen Wirkungsrichtung der Trossenzuganteile lässt sich in vielen Fällen ein gegenüber dem Regelwerk geringerer charakteristischer Wert für den Trossenzug ermitteln, welcher auf physikalisch plausiblen Grundlagen basiert und zudem das System Schiff-Trosse abbildet. Einige mit diesen Voraussetzungen geführte Beispielrechnungen haben für den Pollerzapfen einen Bemessungswert von  $P_{z,d} \approx 200 \text{ kN}$  ergeben, welcher gut mit der in den Klassifikations- und Bauvorschriften des GL angegebenen Bruchlast für Festmachertrossen korreliert. Diese Vorgehensweise wird auch durch Ergebnis der in Regie der Wasser- und Schifffahrtsämter an mehr als 800 Pollerkonstruktionen unterschiedlichster Bauart durchgeführten Zugversuche bestätigt. Ebenso bestätigte sich die Zweckmäßigkeit der Differenzierung der Poller(zapfen)- und Verankerungslasten, weil damit im Falle einer nicht generell ausschließbaren Überbeanspruchung dem einfacher instandsetzbaren Teil die maßgebliche Schädigung zugewiesen wird.

Wie bereits erwähnt, verursachen bei den eigentlichen Pollerkonstruktionen immer die Bremskräfte des Schiffes die maßgeblichen Belastungen. Dabei wird der Haltebolzen (Pollerzapfen) unabhängig von der Lastrichtung am stärksten beansprucht. Da das Tragverhalten des Systems "Pollerzapfen-Unterkonstruktion" mit herkömmlichen Berechnungsmethoden nur unzureichend bewertet werden kann, wurden im Jahre 2005 im Rahmen einer Fremdvergabe spezielle numerische Untersuchungen mittels FEM durchgeführt (Bild 3).

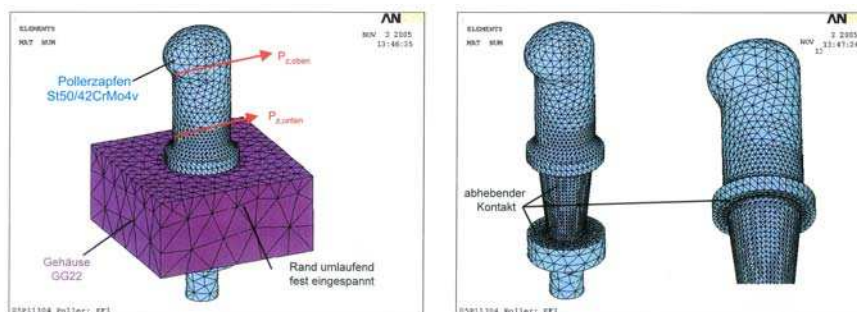


Bild 3: Vernetztes Volumenmodell Konstruktionsform 1 (konischer Zapfen aus St 50 bzw. Vergütungsstahl) mit Randbedingungen

Für einen besonders häufig verwendeten Nischenpollertyp wurden nichtlineare FEM-Berechnungen für unterschiedliche Lastfälle, Materialkombinationen und Pollergeometrien aufgestellt. Mit dem einge-



setzten Programmsystem ANSYS konnten die entsprechenden Materialgesetze berücksichtigt werden und es konnte die Kopplung Zapfen-Unterkonstruktion realitätsnah abgebildet werden.

Zu dem mit der Frage des Trossenzugansatzes in direktem Zusammenhang stehenden Umrüstungsbedarf an Pollern der Binnenschiffahrtsschleusen kristallisierten sich anhand der inzwischen vorliegenden Berichte der WSD'n und der von der BAW vorgenommenen Auswertungen und theoretischen Untersuchungen einige Entscheidungsgrundsätze heraus, die in dem im Dezember 2007 an das BMVBS gegebenen BAW-Bericht zur Gesamteinschätzung des Umrüstungsstands im Einzelnen benannt wurden.

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

Neben den Untersuchungsergebnissen zum Trossenzugansatz sollen auch die Ergebnisse der für differenzierte Zapfenformen geführten FEM-Untersuchungen in einem Abschlussbericht zusammengefasst werden, dessen Fertigstellung wegen anderer dringlicherer Projekte verschoben werden musste.

Es ist davon auszugehen, dass der für die DIN 19703, Ausgabe 11/1995, inzwischen erkennbar gewordene Fortschreibungsbedarf hinsichtlich der Lastansätze bei Pollern keine Änderungen erbringen wird. Auch wird der Grundsatz bestehen bleiben, diese Lastansätze beim Neubau von Schleusen mit entsprechenden Regelabmessungen ohne Einschränkung weiterhin zu berücksichtigen. Die eigentliche Zielstellung des FuE-Themas, unter Beachtung von Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitsaspekten Trossenzugansätze vor allem auch für ältere und kleinere Schleusenbauwerke zu entwickeln, wird insofern vom Ergebnis einer Normüberarbeitung unberührt bleiben. Entsprechende Hinweise auf eine unter bestimmten Voraussetzungen differenzierbare Verfahrensweise beim Trossenzugansatz könnten jedoch mit aufgenommen werden. Das Vorhaben wird in 2010 abgeschlossen.

## Modellversuche zum Einsatz von Gleitpaarungen im Stahlwasserbau

Netzplan-Nr.: A39510210239

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

Durch den kombinierten Einsatz von nichtrostendem Stahl und unlegiertem Stahl kam es in den letzten Jahren an einigen Stahlwasserbaukonstruktionen zu nicht unerheblichen Korrosionsschäden. Diese Schäden entstanden überwiegend infolge elektrochemischer Korrosion (Bimetallkorrosion, Bild 1). Auf Grund dieser Schäden ist es zwingend erforderlich geeignete Ersatzmaterialien zu finden.

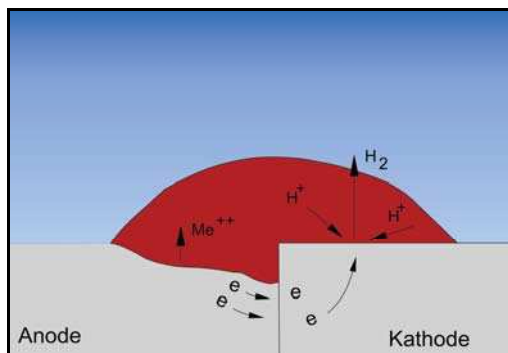


Bild 1: Korrosionselement der elektrochemischen Korrosion

Umfangreiche Recherchen in den letzten Jahren zeigten, dass als Ersatzmaterial Kunststoff durchaus geeignet erscheint. Auf vorhandene Materialkennwerte (Alterungsbeständigkeit, Festigkeit, Quellverhalten usw.) für Kunststoffe kann zurückgegriffen werden. Bei den Reibbeiwerten zeigte sich, dass zwar entsprechende Werte durch z. B. Materialhersteller angegeben werden, diese jedoch auf den geplanten Anwendungsfall nicht übertragbar sind. Um jedoch einen sicheren Betrieb der Stahlwasserbauverschlüsse zu garantieren, ist es erforderlich, dass die jeweiligen Reibbeiwerte unter realistischen Bedingungen bestimmt werden und Erkenntnisse zum Verschleißverhalten der Gleitpaarungen vorliegen. Auch zur Berechnung der Antriebsleistung ist der exakte Reibbeiwert zwingend erforderlich.

#### 1.2 Bedeutung für die WSV

Aufgrund der Korrosionsschäden an Stahlwasserbauten der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV), die nur zeit- und kostenintensiv behoben werden können, ist es erforderlich geeignete Ersatzmaterialien zu finden. Im Merkblatt "Einsatz von nichtrostendem Stahl im Stahlwasserbau" werden bereits einige Ersatzmöglichkeiten aufgezeigt. Eine zufrieden stellende Lösung für Schleifflächen aus nichtrostendem Stahl konnte noch nicht aufgezeigt werden.

#### 1.3 Untersuchungsziel

Daher ist geplant, für Verschlüsse im Stahlwasserbau die Dichtungsschleifflächen, Dichtungsanschlüsse und ggf. auch weitere Gleitflächen zukünftig aus geeigneten Kunststoffmaterialien herzustellen, um damit auf den bisher bei solchen Konstruktionen üblichen Einsatz von nichtrostendem Stahl weitestgehend verzichten zu können. Eingesetzt werden solche speziellen Konstruktionen an Betriebsverschlüssen (z. B. bei Längskanal- / Umlaufkanalverschlüssen, Sparbeckenverschlüssen, und bei Schleusen- und Wehrverschlüssen) von Stauanlagen, die entweder neu gebaut werden oder bei denen für die Verschlüsse Ersatzinvestitionen vorgenommen werden müssen. Im Rahmen von Modellversuchen sollen die beim Betrieb der Verschlüsse auftretenden Situationen möglichst praxisnah nachgebildet werden.

## 2 Untersuchungsmethoden

Über die Gleitbewegung eines Konstruktionselementes (Dichtung, Gleitkufe) auf einer Kunststofffläche (Fixteil) soll Folgendes untersucht werden:

- Verschleißverhalten der Kunststoffe (Abriebfestigkeit der Oberflächen, Rautiefe des Gleitpartners nach dem Versuch)
- Reibbeiwerte (Gleitreibungszahl  $\mu$ ) für die Ermittlung der Dichtungsreibung bzw. Gleitreibung (bei Gleitkufen) nach DIN 19704 "Stahlwasserbauten, Teil 1: Berechnungsgrundlagen", Mai 1998 für verschiedene Kunststoffe (Elastomer auf Kunststoff und Kunststoff auf Kunststoff)

Alle Versuche sollen unter Wasser ausgeführt werden bzw. es sollen Bedingungen gegeben sein, die dem Zustand „wasserbenetzt“ (vgl. DIN 19704-1, 05/1998, Tab. 3) entsprechen. Bild 2 zeigt einen schematischen Versuchsaufbau zur Bestimmung des Reibbeiwertes.

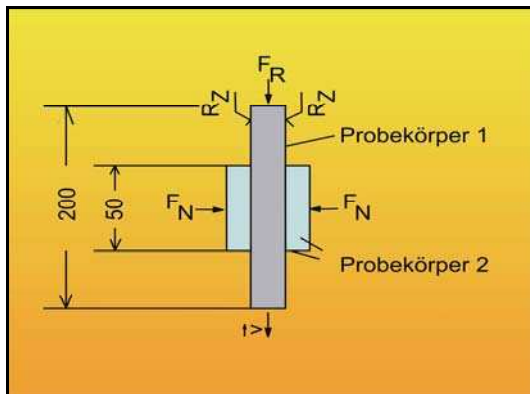


Bild 2: Schematischer Versuchsaufbau, unmaßstäblich (Skizze: Prof. Dr.-Ing. Schmaußner)

## 3 Ergebnisse

In 2005 wurden bereits mehrere Prüfinstitute angeschrieben und um Abgabe eines Angebots hinsichtlich der erforderlichen Versuche an Elastomeren auf Kunststoffen aufgefordert. Auch ein detaillierter Zeitplan sollte durch die Prüfinstitute abgegeben werden. Nach der Reduzierung des Prüfumfanges und der Modifikation der Ausschreibung konnte im Jahr 2007 das Institut für Verbundwerkstoffe in Kaiserslautern mit der Versuchsdurchführung beauftragt werden.

Mit den ersten Voruntersuchungen begann das Institut im November 2007. Anhand dieser Voruntersuchungen wurden vier Materialien ausgewählt, die im Jahr 2008 in Langzeitversuchen weiter beprobt worden sind. Im Juni 2008 legte das Institut für Verbundwerkstoffe in Kaiserslautern der BAW den Zwischenbericht vor. Anhand der Ergebnisse des Zwischenberichts wählte die BAW die Werkstoffe PVC-U, PE-UHMW, POM-C und zu Vergleichszwecken ein Edelstahl zur weiteren Beprobung aus. Der Abschlußbericht ist im März 2009 vorgelegt worden.

Die Versuchsergebnisse der Prüfungen zeigten, dass die im Langzeitversuch getesteten Kunststoffe einen geringfügig günstigeren Reibbeiwert aufweisen als der Edelstahl. Im Mittel liegt der Reibbeiwert von „Elastomer auf Kunststoff“ bei  $\mu = 0,61$ .

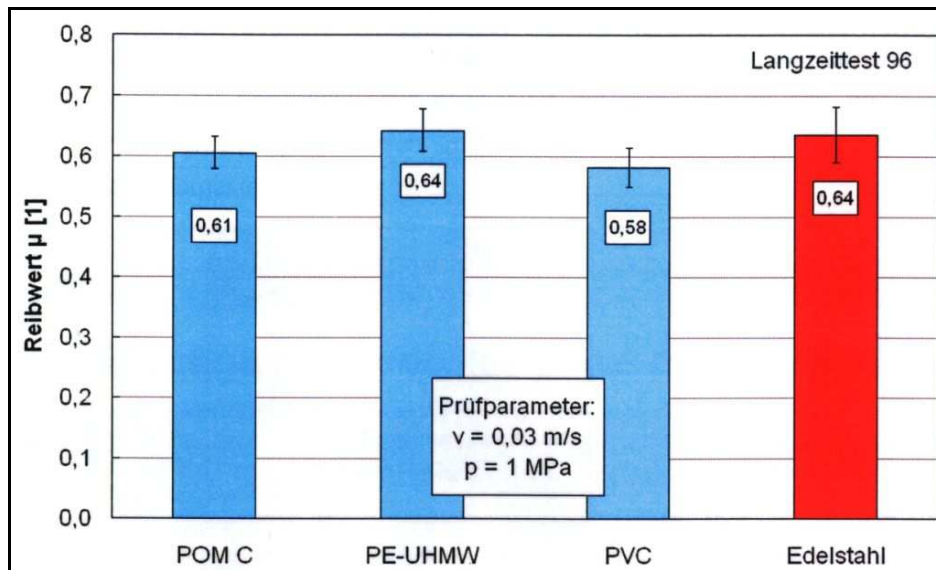


Bild 3: Ergebnisse der Versuche an drei Kunststoffen im Vergleich zum nichtrostenden Stahl, Versuchsdauer 96 h [1]

Im 3. Quartal 2009 wurde die Notwendigkeit festgestellt, dass weitere Versuche erforderlich sind, um auch Reibbeiwerte für „Kunststoff auf Kunststoff“ zu ermitteln. Das Institut für Verbundwerkstoffe soll diese Versuche weiter betreuen und wurde daher zur Abgabe eines Angebots aufgefordert und nach Eingang des Angebots auch beauftragt. Der Abschlußbericht über diese Versuche soll bis 31.05.2010 der BAW vorliegen.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Seit Dezember 2009 laufen weitere Versuche. Bei diesen Versuchen wird der Reibbeiwert von POM, PVC und PA 6 G und auf PE-UHMW bestimmt. Die Versuchsdauer beträgt je Werkstoff 3 Monate und es wird mit einem Anpressdruck von 8 MPa und einer Geschwindigkeit von 0,05 m/s gefahren. Die Versuche sollen bis Ende Mai 2010 abgeschlossen sein.

Die nachfolgenden Versuche sind bereits ausgeführt:

In getrennten Versuchen wurden zunächst zehn unterschiedliche Kunststoffe untersucht. Pro Material wurden vier parallele Versuche durchgeführt.

- Dichtung: Wulstprofil ohne Bohrung,  
Material: NR/SBR, Härte  $65 \pm 5$  Shore A in Anlehnung an DIN 53505 (aus WSV-Bestand)
- Die Auswahl der zehn unterschiedlichen Kunststoffe erfolgte in Absprache mit der BAW

Basierend auf den Ergebnissen der Vorversuche wurden dann 4 Kunststoffe ausgewählt, die mit einem Laufweg von 73.000m einer Laufgeschwindigkeit von 0,03m/s und eine Linienlast von 1 MPa weiter beprobt werden.

Das vorhaben wir in 2011 abgeschlossen.

#### 5 Literatur

- [1] Abschlussbericht "Ermittlung tribologischer Kennwerte von Kunststoffen für den Einsatz als Alternativwerkstoffe im Stahlwasserbau" des Instituts für Verbundwerkstoffe in Kaiserslautern März 2009, unveröffentlicht.

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

**Netzplan-Nr.:** A39510210309

**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 sog. Blatt 87 (ZTV-ING) eingesetzt. Dabei wird die Beschichtung werksseitig meist bis zur Zwischenbeschichtung aufgebracht. Daran schließen sich übliche Zwischenstandzeiten von 6 bis 18 Monaten unter den Nutzungsbedingungen des Verkehrs an. Beim späteren Aufbringen der farbgebenden Deckbeschichtung (DB) kann es zu Haftungsproblemen kommen.

Die bisherigen Kenntnisse zeigen, dass die Zwischenbeschichtung aus Epoxidharz (EP) eine gewisse Instabilität (Abbau der Zwischenbeschichtung durch UV-Strahlen und Bewitterung) zeigt, die in Folge dessen zu Haftungsproblemen mit der nachfolgenden Deckbeschichtung aus Polyurethan (PUR) führt. Ziel wird sein, diese Haftverbundprobleme zu vermeiden. Verschiedene Beobachtungen an Bauwerken (ISL-Leipzig, 2007 [1]), wie auch die Auswertung eines Forschungsvorhabens (FPL-Stuttgart, 2007 [2]) weisen auf Haftungsprobleme der DB aus 2K-PUR auf der Zwischenschicht aus EP nach kürzerer wie auch nach längerer Zwischenstandzeit hin. Untersuchungen der DB, BAST & BAW zeigten ähnliche Tendenzen [3].

Durch die BAW wurden in der Vergangenheit ebenfalls Schadensuntersuchungen an verschiedenen Brücken mit Enthaftungserscheinungen durchgeführt, welche allerdings auch auf osmotische Effekte hinweisen.

Als ein weiteres Problem hat sich die Farbstabilität der farbgebenden Deckbeschichtung erwiesen. Hier liegen erste Resultate von BAW-Untersuchungen vor [4], welche unter Praxisbedingungen noch nachvollzogen werden sollen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Wasser- & Schifffahrtsverwaltung (WSV) besitzt etwa 1.300 Brücken, die mit dem o.g. Schutzsystem 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.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Untersuchungsziel wird sein, unter den gegebenen Umständen – Komplettbeschichtung im Werk nicht möglich – eine gute Qualität des Korrosionsschutzes zu erzielen. Hierzu sind Variationen zum bisher üblichen Applikationsablauf, unter Einsatz neuer Stoffe (z.B. Zwischenbeschichtung aus UV-verträglichem 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 sollen sich auf unterschiedliche Vorgehensweisen – Labor und Bauwerk - stützen.

In einem Praxisversuch werden ab 2010 an einem realen Objekt (Haus-Kannener-Brücke, Datteln) Beschichtungssystemvarianten getestet.

Die Resultate einer früheren Versuchsserie (Untersuchungen der DB, BAST & BAW zw. 1986 bis 1996) werden nochmals ausgewertet und mit aktuell ermittelten Daten der Haftabzugsbestimmungen verglichen. Hier erhofft man sich Hinweise auf den zeitlichen Verlauf und die geografisch-klimatische Abhängigkeit der Güte der jeweiligen Haftung. Mit diesen Prüfplatten sollen u.a. noch Bewitterungsversuche im Labor durchgeführt werden, um auch eine diesbezügliche Haftungsschwächung zu verfolgen.

Die jeweiligen Prüfungen werden mit Methoden der Analytik (FTIR-Spektroskopie) begleitend untersucht, wobei spezielles Augenmerk auf die prognostizierten Abbauprodukte des Epoxidharzes gelegt wird. Hier werden noch Tests zur Nachweisführung der Anwesenheit dieses störenden Abbauprodukts durchgeführt, um auch diese vor Ort, auf der Baustelle! bestimmen zu können. Hierdurch wäre zum einen ein eindeutiger Nachweis der Schadensursache aber zum anderen auch eine Überprüfung der Zwischenbeschichtung vor Applikation der finalen Deckbeschichtung nach Bl. 87 möglich. Daraus ergäben sich dann noch vorbeugende Eingriffsmöglichkeiten.

## 3 Ergebnisse

Es wurden Eluate von bewitterten Zwischenbeschichtungen aus Epoxid erstellt. Nach dem Eintrocknen der filtrierten Eluate wurden gelbliche, amorphe, bzw. spröde Rückstände erhalten. Diese Rückstände wurden mit unterschiedlichen Lösemitteln aufgenommen und mit Hilfe der Fouriertransformati-  
ons-Infrarotspektroskopie (FTIR) untersucht und oberflächenaktive („Abbau“-) Produkte (Carbonsäureamide, Carbonsäuren, deren Ammoniumsalze bzw. substituierte Aminoessigsäuren) detektiert.

Die Überprüfung alter Prüfplatten zeigte, dass es keine kontinuierliche Schwächung des Haftverbundes in Abhängigkeit zur Zwischenstandzeit gibt, vielmehr spontane, eventuell kurzfristige, witterungsbedingte Haftverbundsschwächungen bestehen (Bild 1). Zudem konnte gezeigt werden, dass der ursprüngliche Haftabzugswert (trocken) sich auch nach dem Belastungstest (Nasspolster, Kondensatwasserbelastung) mehr oder minder durchpaust, bzw. verstärkt wird.

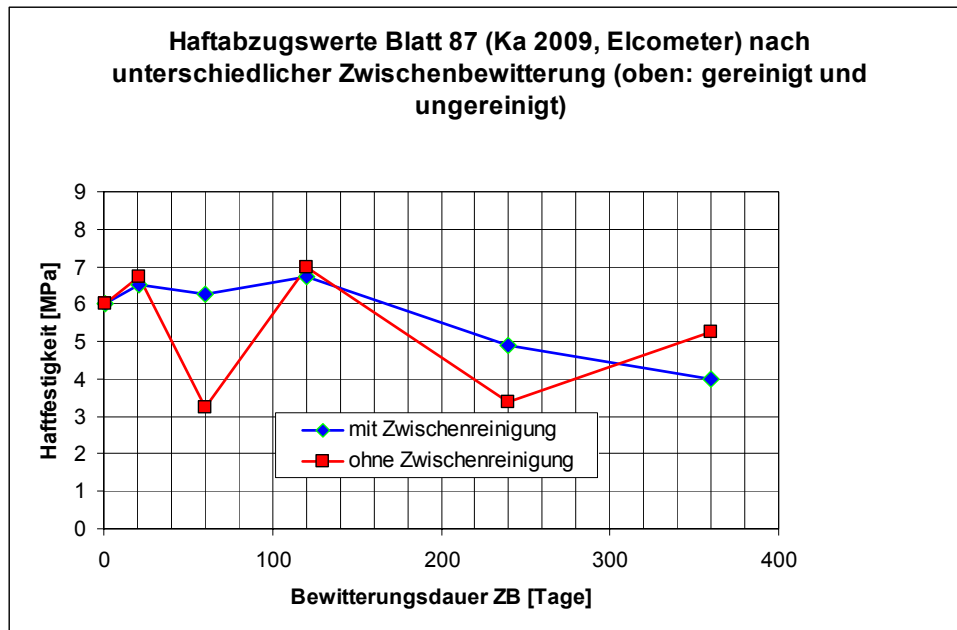


Bild 1: Verlauf der Haftung der Deckbeschichtung in Abhängigkeit zur Bewitterungsdauer der Zwischenbeschichtung

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Versuchsplatten (Untersuchungen der DB, BAST & BAW) werden weiterhin hinsichtlich der Haftfestigkeiten untersucht. Zudem werden Prüfplatten für Korrosionsschutzuntersuchungen (Belastung unter Laborbedingungen) präpariert und untersucht. Dabei können verschiedene Belastungen auf Basis der ISO 6270 zur genauen Beurteilung einer evtl. vorliegenden Haftverbundstörung herangezogen werden:

- Δ T- Test (ISO 6270-1 und -2)
- Kondensatbelastung mit (ISO 6270-2 AHT) und ohne (ISO 6270-2 CH) Unterbrechung.

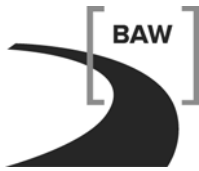
Es wird die Entwicklung auf den Baustellen verfolgt, insbesondere der Einsatz neuer Reinigungsmittel, welche nach Herstellerangaben die beschriebenen Haftungsprobleme vermeiden helfen. Hier sind auch noch Laborversuche hinsichtlich osmotischer Effekte vorgesehen.

Für das „Versuchsobjekt“ Haus-Kannener-Brücke Nr. 59 ist eine intensive Betreuung, beginnend mit der Bauausführung und fortführend mit der Prüfplattenüberwachung, vorgesehen. Die Brücke Nr. 474 (Bereich Helmstedt) wurde mit einer (alternativen) PUR-Zwischenschicht aufgebaut. Die Prüfung des Haftverbundes wird vor Ort vorgenommen.

Die Resultate der Korrosionsschutztests an alten Prüfplatten werden zusammengestellt. Dabei können die Erfahrungen der bisherigen Untersuchungen an den vorhandenen Prüfplatten genutzt werden. Durch gezielte Bewitterungsversuche sollten die eluierbaren Produkte (systemimmanente Ausscheidungen) nicht nur an Stahlhochbau- und an Stahlwasserbaubeschichtungen auf EP-Basis untersucht werden. Hierbei sollte es zu einer genaueren Untersuchung der Identität dieser Stoffe kommen und der Versuch einer möglichen Quantifizierung z.B. durch Leitfähigkeitsmessungen oder Titrations unternommen werden.

Die Farbabstandsmessungen bei BAW werden weitergeführt.

Das Vorhaben wird in 2010 abgeschlossen.



## 5 Literatur

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



## **Machbarkeitsstudie zum Einsatz von Schleusentoren aus Faserverbundwerkstoffen**

**Netzplan-Nr.:** A39510270001

**Projektleiter:** BOR U. Enders, Abteilung Bautechnik, Referat Stahlbau und Korrosionsschutz (B2)

**E-Mail:** uwe.enders@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

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

Kann der klassische Baustoff Stahl bei der Konstruktion von Stemmtorflügeln an Schleusen von Nebenwasserstraßen durch alternative Baustoffe bzw. Bauweisen substituiert werden? Im Bereich der französischen Wasserstraßen sind Konstruktionen aus Glasfaserverbundwerkstoffen mit Erfolg eingesetzt worden. Diesbezügliche Erfahrungen im Bereich der WSV liegen nicht vor.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Ein Großteil der Schleusen im Bereich der WSV wurde vor dem Krieg errichtet und hat somit die normative Nutzungsdauer bereits erreicht und z.T. bereits deutlich überschritten. Dies trifft vor allem für Schleusen an Nebenwasserstraßen zu. Die Torarmaturen (Füll- und Entleerungsschütze, Antriebe etc.) entziehen sich auf Grund ihres Designzeitpunktes (viel Personal zur manuellen Bedienung) dem Ziel, diese Anlagen zu automatisieren bzw. fernzusteuern. Aus den genannten Gründen besteht in den nächsten Jahren in Bereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) ein kontinuierlicher Erneuerungsbedarf. Die Möglichkeit des Einsatzes von Faserverbundkonstruktionen wurde durch die WSV in der Vergangenheit nachgefragt.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel des Vorhabens war die Prüfung einer wirtschaftlichen und skalierbaren Faserverbundkonstruktion für den Einsatz an den Schleusen der Nebenwasserstraßen, welche unempfindlich gegen Korrosion und leicht automatisch steuerbar ist, sowie durch ihr geringeres Gewicht die vorhandene i.d.R. alte Massivbaukonstruktion nicht zusätzlich belastet. Wesentlichen Vorteile werden gesehen in:

- Reduzierten Wartungs- und Unterhaltskosten durch günstige Formgebung und Werkstoffwahl
- Wirtschaftliche Fertigung durch neue Werkstoffe und modulare Bauweise
- Reduzierte Belastung des tragenden Mauerwerkes durch geringeres Gewicht
- Einfache Adaption des Schleusentores für gängige Durchfahrtsbreiten (Standardschleusentor).

### **2 Untersuchungsmethoden**

Vergabe der Leistungen an einen Entwicklungs- und Fertigungsdienstleister, welcher in der praxis- und herstellungsnahen Entwicklung von marinem Verbund - Kunststoff - Konstruktionen erfahren ist. Aufstellung einer Machbarkeitsstudie mit folgendem Inhalt:

- Erstellung Lasten-/Pflichtenheft (Definition Basisvariante)
- Werkstoffscreening und -Vorauswahl
- Bauweisenentwicklung der Basisvariante
- Strukturmechanische Vorauslegung Basisvariante
- Ausarbeitung Fertigungs- und Montagekonzept
- Kostenvoranalyse

### **3 Ergebnisse**

Die im Rahmen der Machbarkeitsstudie auszuführenden Arbeiten und Untersuchungen wurden an die ADETE-GmbH vergeben und mit deren Fertigstellung im Dezember 2008, nach einer Bearbeitungszeit von fünf Monaten der BAW übergeben.

- Die Torflügel-Querschnittsform, siehe Bild 1, ist so gewählt, das sie adaptierbar auf verschiedene Schleusendurchfahrtsbreiten anwendbar ist. Charakteristisch ist hier die Kreisbogenform, die bei jeder Schleusenvariante denselben Radius besitzt und durch geradlinige Endabschnitte entsprechend der geforderten Schleusenbreite angepasst wird.



Bild 1: Bauraumgerechte Gestaltung der Torflügelform

Im Randbereich der Stemmortorkeonstruktion an den Wende- und Schlagsäulen sowie an den Drempeledichtungen sind metallische U-Profile vorgesehen, die als flächige Krafteinleitungselemente und als Dichtungsaufleger funktionieren.

- Für die Umsetzung der im Lastenheft aufgeführten Anforderungen an ein Schleusenstemmtor wurde eine FKV-Konstruktion (FKV – Faser-Kunststoff-Verbund) in Sandwichbauweise entwickelt, die sich durch hohe Leichtbaugüte und werkstoffgerechte Gestaltung auszeichnet. Im Bild 2 wird die Sandwichbauweise eines Torflügels im Schnitt dargestellt.

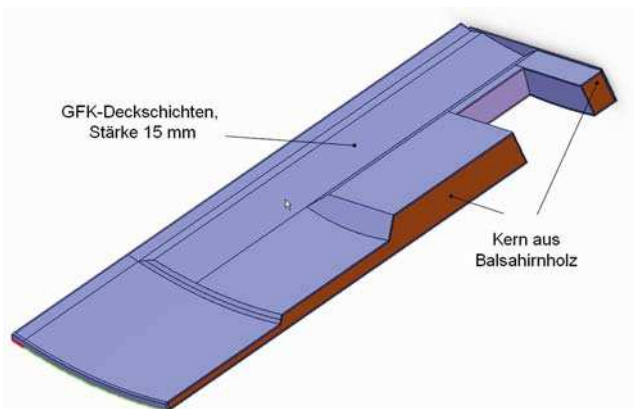


Bild 2: Schnitt durch die 6 m hohe Referenzkonstruktion

- Die „Außenhaut“ (der sichtbare Teil) der Konstruktion besteht aus einem 15 mm dicken Glasfaser-verstärkten Epoxid-Laminat, das einen symmetrischen Lagenaufbau im ausgeglichenen Winkelverbund besitzt und somit quasiisotrope Werkstoffkenngrößen besitzt. Durch die Wahl eines hochwertigen Epoxidharzsystems, bestehend aus aufeinander abgestimmten Komponenten, ist die geforderte dauerhafte Wasserbeständigkeit gewährleistet. Die UV-Beständigkeit wird mit im Bootsbau üblichen Lackschichtsystemen gewährleistet. Die Wartungsintervalle der Faserverbundkonstruktion sind gleichwertig zu konventionellen Stahlkonstruktionen
- Der komplett vom Laminat umschlossene Kernwerkstoff besteht aus Balsaholz, welches in unterschiedlicher Schichtdicke über die Höhe eingebracht wird, um die Konstruktion belastungsgerecht an die hydrostatischen Druckverhältnisse anzupassen. Hierbei handelt es sich um einen nachwachsenden Rohstoff, der sich in der Faserverbundtechnik bewährt hat und mittlerweile in verschiedensten Anwendungsgebieten verarbeitet wird.
- Die Masse der Torflügel ist aufgrund der verwendeten Materialien (Balsaholz, FKV) im Vergleich zu konventionellen Stahlkonstruktion sehr gering. Es ist mit einer Gewichtseinsparung von über 50 % zu

rechnen, was zu einer deutlichen Entlastung der Lagerstellen im Mauerwerk führt. Die Lagersituation wird so übernommen, dass die Hals- und Spurlagervorrichtungen am Betonmauerwerk verwendet werden können.

• Für die Lastfälle (Betrieb, Revision, Eisdruck und Eigenlast) wurde eine statische Analyse mit dem Programmsystem ANSYS unter Berücksichtigung des hoch anisotropen Materials (Faserverbundwerkstoff) ausgeführt. Dabei erfolgte die Betrachtung jeweils mit und ohne Berücksichtigung einer Abstützung am Drempel. Die statische Untersuchung, sowie die Betrachtung des Beulverhaltens haben gezeigt, dass die FKV - Stemmorkonstruktion den Anforderungen des Lastenheftes gerecht wird. Die errechneten Spannungen in der Struktur liegen weit unterhalb der maximal zulässigen Werte. Dies gilt vor allem für den Balsaholzkern und der nach dem Tsai-Wu Versagenskriterium ausgewertete Laminataufbau. Nach diesem Kriterium ist die Faserverbundstruktur in den Schützöffnungen am höchsten belastet und das FKV-Material nur zu 10 – 15 % ausgelastet. Auch die Lasten aus Eisdruck können schadfrei abgetragen werden. Aus der linearen Beulanalyse der Konstruktion resultiert eine ca. 61-fache Sicherheit gegen Beulversagen (Durchschlagen). Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 1 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 1: Zusammenfassung Berechnungsergebnisse

| Lastfall   | 1            |              | 2             |              | 3                  |              | 4            | Grenzwerte |        |
|--|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------------|--------------|--------------|------------|--------|
|  | Betriebsfall |              | Revisionsfall |              | Betrieb + Eisdruck |              | Eigengewicht |            |        |
|  | mit Drempel  | ohne Drempel | mit Drempel   | ohne Drempel | mit Drempel        | ohne Drempel |              |            |        |
| Gesamtverformung [mm]                            | 1,24         | 2,00         | 1,68          | 2,89         | 5,17               | 4,94         | 0,45         | [-]        |        |
| Tsai-Wu-Kriterium, Faserverbund [-]              | 0,35         | 0,47         | 0,45          | 0,64         | 0,36               | 0,48         |              | 1,00       |        |
| maximale Hauptspannung S1 [MPa], Balsaholzkern   | Zug          | 1,41         | 0,93          | 1,98         | 1,29               | 1,73         | 1,71         | 0,21       | 13,00  |
|  | Druck        | -1,07        | -1,26         | -1,39        | -1,70              | -1,01        | -1,15        | -0,02      | 12,67  |
| mittlere Hauptspannung S2 [MPa], Balsaholzkern   | Zug          | 0,50         | 0,39          | 0,61         | 0,55               | 0,47         | 0,40         | 0,11       | 13,00  |
|  | Druck        | -2,17        | -2,26         | -2,88        | -3,02              | -2,22        | -2,31        | -0,08      | 12,67  |
| minimale Hauptspannung S3 [MPa], Balsaholzkern   | Zug          | 0,15         | 0,03          | 0,21         | 0,06               | 0,14         | 0,08         | 0,21       | 13,00  |
|  | Druck        | -3,31        | -4,59         | -4,41        | -6,34              | -3,42        | -4,57        | -0,02      | 12,67  |
| Von Mises-Vergleichsspannung [Mpa], Stahlprofile |              | 129          | 160           | 189          | 243                | 324          | 308          | 35         | 460,00 |

Ergebnis 1: Die gewählte Torkonstruktion erfüllt die statischen und materialtechnischen Anforderungen und ist in dieser Hinsicht einer Stahlkonstruktion gleichwertig und ist durch vorhandene Fachbetriebe problemfrei herstellbar!

Ergebnis 2: Eine erste Vorkostenanalyse ergab, dass ab einer Kleinserienfertigung eine wirtschaftliche Herstellung möglich erscheint.

2009 wurden diese Ergebnisse auf dem BAW-Kolloquium „Stahl(wasser)bau – Wohin geht der Weg? Entwicklungstendenzen im Stahlbau und Korrosionsschutz“ vorgestellt. Im Anschluss erfolgten Sondierungsgespräche über die Möglichkeit eines prototypischen Einsatzes der Konstruktion in der WSV. Die zu erwartende Herstellungs- und Betriebskosten (Wirtschaftlichkeit) waren dabei ein zentraler Punkt. In diesem Zusammenhang erfolgte eine umfangreiche Recherche zu den Herstellungs- und Instandhaltungskosten von stählernen Schleusen(Stemm)toren an Nebenwasserstraßen der WSV. Im Resultat dieser Untersuchungen wird deutlich, dass ein GfK-Tor vorerst in der Herstellung teurer (ca. 10T€/Torflügelpaar), jedoch im Betrieb, hier hauptsächlich die Kosten für die Beschichtungserneuerung betrachtend, über die Standzeit von 70 Jahren ca. 40 T€/Torflügelpaar günstiger, als eine vergleichbare Stahlkonstruktion ist. Dabei konnten Vorteile, wie das geringere Gewicht (50%) und die deutlich reduzierte Konstruktionsoberfläche noch nicht quantifiziert werden und blieben somit unberücksichtigt.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Nach erfolgreichem Abschluss der Projektphase Machbarkeit sowie der ausgeführten Wirtschaftlichkeitsanalyse soll, nach Rückkopplung mit der WSV, in 2010 und 2011 ein Baumuster-Entwurf und die dazugehörige Statik erstellt werden.

**Frostwiderstand zementgebundener Baustoffe****Netzplan-Nr.:** A39510308099**Projektleiter:** BDir. 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 bislang 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 oder description concept). Angesichts der rasanten technischen Entwicklung auf dem Baustoffsektor und eines grenzüberschreitenden europäischen Marktes wird es mehr und mehr 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 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 liegen bislang 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 Frostwiderstandes 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 soll in drei parallel zu bearbeitende Teile gegliedert werden:

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. Der Schwerpunkt der Untersuchungen soll auf der Bestimmung von Festigkeiten, Porenstruktur und Frostwiderstand der einbezogenen Betone liegen. Zur Bestimmung der Porenstruktur sollen insbesondere die Wasseraufnahmen unter Atmosphärendruck und unter Druck von

15 N/mm<sup>2</sup> sowie die Quecksilberdruckporosimetrie eingesetzt werden. Als Frostprüfverfahren soll das in der ZTV-W LB 219 (1997) beschriebene CIF-/CDF-Verfahren herangezogen werden. Der Großteil der Untersuchungen soll von der BAW selbst durchgeführt werden. Ausgenommen hiervon sind bestimmte Vergleichsuntersuchungen, mikroskopische Untersuchungen sowie ein Teil der Versuche mit dem Quecksilberdruckporosimeter.

**Teil II:**

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

**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 Bohrkernentnommen worden, die derzeit in der BAW untersucht werden. 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 dem ibac und der Fa. CEMEX Betonprobekörper ausgelagert, welche unter Verwendung von CEM III/A hergestellt worden sind. 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. An diesem Fertigteil sollen im Rahmen des FuE-Vorhabens Grundsatzuntersuchungen durchgeführt werden.

**Teil II:**

Die Temperaturmessungen an der Schleusenanlage Eckersmühlen sind ausgewertet worden, die Ergebnisse wurden im Arbeitskreis Betontechnik, Unterausschuss Frost, vorgestellt und in der Ausgabe 5/2000 der Fachzeitschrift "Beton" sowie im Heft 560 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton veröffentlicht.

Messaufnehmer für die Bestimmung von Temperaturen und Feuchtigkeitsgehalten wurden in einer Kammerwand der Doppelschleuse Hohenwarthe sowie in verschiedenen Sparbeckenwänden der Schleuse Hilpoltstein installiert, die Messungen erfolgen kontinuierlich, die Messdaten werden per Mobilfunkverbindung an die RWTH Aachen übertragen. In 2007 wurde der 2. Zwischenbericht der RWTH Aachen mit ersten Messergebnissen und Auswertungen vorgelegt. Wesentliche Ergebnisse dieser Bauwerksuntersuchungen wurden im Januar 2010 im Rahmen eines Frostkolloquiums in Berlin vorgestellt, welches gemeinsam von DAfStb, BASt und BAW veranstaltet worden ist.

Derzeit laufen Vorbereitungen zur Auslagerung einer Betonplatte im Nahbereich der Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein, mit deren Hilfe die Exposition XF3 an einer horizontalen Betonfläche simuliert werden soll.

**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. In dem aus diesem Bericht entnommenen Bild 1 werden schematisch die aus den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse zum Sättigungsgrad des Betons bei unterschiedlicher

Bauteileexposition (XF1 bis XF4 gemäß EN 206-1 / DIN 1045-2) in der Randzone von Betonbauteilen (Messtiefe ca. 7 mm) dargestellt. Danach sind jahreszeitliche Schwankungen in den Expositionen XF1 und XF2 wesentlich stärker ausgeprägt als in den Expositionen XF3 und XF4. 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 und Klärbecken war der Sättigungsgrad des Randbereiches in der Wasserwechselzone hingegen weitgehend konstant und entsprach zumeist dem Wert, der bei der Bestimmung der Wasseraufnahme des jeweiligen Betons unter Atmosphärendruck im Labor gefunden wurde (vgl. XF3 und XF4 in Bild 1). Kontinuierlich hohe Wassersättigungsgrade in Verbindung mit ausgeprägten Temperaturänderungen infolge betriebsbedingter Wasserstandsänderungen führen bei Verkehrswasserbauwerken zu Frostbeanspruchungen, die für deutsche Gegebenheiten dem pessimistischen Bereich zuzuordnen sind.

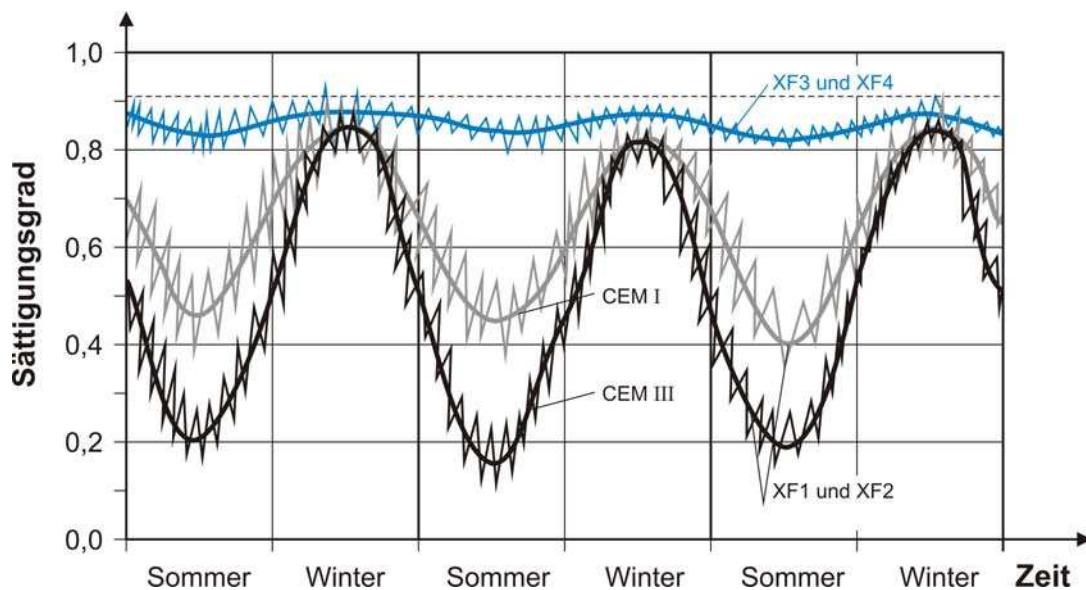


Bild 1: Schematischer Verlauf der jahreszeitlichen Schwankungen des Sättigungsgrades von untersuchten Bauteilen in einer Messtiefe von 7 mm (aus Entwurf Bericht V453-2 der Universität Karlsruhe, jetzt: KIT)

Teile I bis III:

Die bislang im Rahmen dieses Forschungsvorhabens gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse 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. Dieses Merkblatt wird sowohl für den Neubaubereich (ZTV-W LB 215 (Ausgabe 2004)) als auch für die Betoninstandsetzung (ZTV-W LB 219 (Ausgabe 2004)) in Bezug genommen.

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

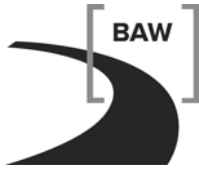
#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Teil I:

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

Teil II:

Beim gemeinsam mit der RWTH Aachen realisierten Untersuchungsprogramm zur Bestimmung des Sättigungsgrades sollen die Temperatur- und Feuchtemessungen an den Schleusen Hilpoltstein und Hohenwarthe bis zum Sommer 2010 weitergeführt und anschließend ausgewertet werden. Die



XF3(horizontal)-Platte soll im Jahr 2010 hergestellt und an der Schleuse Hilpoltstein ausgelagert werden.

Teil III:

Der von der Universität Karlsruhe im Auftrag des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) und der BAW zu erstellende Abschlussbericht der o. g. DAfStb-Arbeitsgruppe wurde in 2009 fertig gestellt und soll voraussichtlich in 2010 als DAfStb-Heft publiziert werden.

Zeitplan:

Der Abschluss des Gesamtvorhabens ist für das Jahr 2014 vorgesehen.

## **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 „dünnschichtiger“ 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 wird<sup>1</sup>. Andererseits wurden einige Instandsetzungssysteme in ihren Eigenschaften z. T. so modifiziert, dass auch bei Altbetonen geringerer Güte ein guter und dauerhafter Verbund sichergestellt wurde<sup>2</sup>, womit eine Applikation in Form dünnschichtiger 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 dünnschichtiger Vorsatzschalen kann für eine Reihe von Bauwerken die Nutzungsdauer durch eine dauerhafte und gegenüber den dicken Vorsatzschalen deutlich kostengünstigere Instandsetzung verlängert werden.

---

<sup>1</sup> Probeinstandsetzung Schleuse Feudenheim 2002/2003

<sup>2</sup> Feldversuch der IMF AG/ StoCretec GmbH an der Schwarzatalsperre 1998 und 2002



### **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 Verbundprobleplatten 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 mit an die geringe Betonqualität des Untergrunds angepassten Eigenschaften appliziert, welche z.T. hinsichtlich des Schwindverhaltens und E-Moduls modifiziert waren. Anhand von Prüfungen der zentrischen Zugfestigkeit an aus den Probewänden entnommenen Bohrkernen wurden bislang keine Verbundschwächungen festgestellt. Um fundierte Aussagen zur Dauerhaftigkeit treffen zu können werden die Flächen über mehrere Jahre beobachtet.

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 war so konzipiert, dass es sich selbst verdichtet. Für den Einbau wurde daher lediglich eine Mörtelpumpe benötigt.



*Bild 1: Einbau des schnell erhärtenden, selbstverdichtenden Instandsetzungsmörtels*

Die Schalung wurde bereits nach 3 Stunden entfernt! Um schwierige Bedingungen zu simulieren, wurde nach dem Ausschalen auf eine Nachbehandlung verzichtet. Dennoch haben sich bislang weder Schwindrissbildungen noch Verbundstörungen eingestellt.

Parallel zur Applikation wurden aus dem Material Laborprobekörper hergestellt und die wesentlichen Festbetoneigenschaften sowie der Frostwiderstand geprüft. Anhand der Laborprüfergebnisse ist das Material für die maßgeblichen Anforderungen geeignet. Um Aussagen zur Dauerhaftigkeit treffen zu können, muss jedoch auch diese Probefläche über einen längeren Zeitraum beobachtet werden.

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

2010: Alle Versuchsflächen werden weiter beobachtet und beprobt.

2011: Bei Eignung des im Oktober 2009 applizierten Materials mit schneller Erhärtung soll damit eine Probefläche an einem Wasserbauwerk instand gesetzt werden.

Das Vorhaben wird voraussichtlich Ende 2012 beendet. Eine Langzeitbeobachtung der geplanten Probeflächen an Bauwerken ist vorgesehen und soll im Rahmen eines Folgevorhabens realisiert werden.

## **Einfluss von Schalung und Nachbehandlung auf die Dauerhaftigkeit geschalter Betonoberflächen**

**Netzplan-Nr.:** A39510310141

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. F. Spörel, Dipl.-Ing. (FH) H. Müller, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B 3)

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

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

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

Die Dauerhaftigkeit eines Betonbauwerks wird wesentlich auch von den Eigenschaften der Betonrandzone beeinflusst. Eine besondere Bedeutung hinsichtlich der Entwicklung der Eigenschaften des oberflächennahen Bereiches kommt dabei der Nachbehandlung der Oberfläche zu. Bei unzureichender Nachbehandlung trocknet der Beton frühzeitig aus und das entstehende Porengefüge sowie nahezu alle dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften können nachteilig beeinflusst werden. Besonders bei langsam erhärtenden Betonen, wie sie im Wasserbau meist eingesetzt werden, wirkt sich eine unzureichende Nachbehandlung deutlich aus. In der aktuellen Normung und Vorschriftenregelung der DIN 1045-3:2008-08 [1] und der ZTV W LB 215 bzw. LB 219 [2], [3] werden daher Regelungen zur Nachbehandlung festgelegt, bei der die Festigkeitsentwicklung der Betone Berücksichtigung findet. Hinsichtlich der Auswirkung der Nachbehandlungsmaßnahmen auf dauerhaftigkeitsrelevante Betoneigenschaften besteht jedoch weiterhin Untersuchungsbedarf.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Durch die Erhöhung der Dauerhaftigkeit wird die Unterhaltung der Bauwerke günstiger und Ausfallzeiten aufgrund von Instandsetzungsmaßnahmen geringer. Die notwendigen Anforderungen an die Nachbehandlung können präzisiert werden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Herausarbeitung des Einflusses von Schalung und Nachbehandlungsart- und -dauer sowie der Betonzusammensetzung auf die Dauerhaftigkeit geschalter Betonoberflächen. Der direkte Vergleich der unterschiedlich behandelten Betonflächen soll Aufschluss über den Einfluss der einzelnen Varianten geben. Die Untersuchungen werden im Hinblick auf einen etwaigen Änderungsbedarf der Regelungen zur Nachbehandlung gemäß ZTV-W LB 215 bzw. LB 219 bewertet.

### **2 Untersuchungsmethoden**

#### **2.1 Betonzusammensetzung**

Es wurden folgende Luftporenbetone untersucht, deren Zusammensetzung die Anforderungen nach ZTV-W LB 215 bzw. LB 219 für einen Einsatz im Bereich von Schleusenammerwänden erfüllt:

- |                                   |          |    |
|-----------------------------------|----------|----|
| • 300 kg CEM I 32,5R + 50 kg SFA; | w/z=0,50 | LP |
| • 320 kg CEM II/B-S 32,5R;        | w/z=0,50 | LP |
| • 320 kg CEM III/A 32,5;          | w/z=0,50 | LP |

#### **2.2 Herstellung großformatiger Probekörper**

Um der Eigenschaft eines massigen Bauteils Rechnung zu tragen und um verschiedene Nachbehandlungsvarianten in die Untersuchungen einbeziehen zu können, wurde eine sechseckige Probekörperform mit einem Abstand der gegenüberliegenden Seiten des Betonblocks von 2 m gewählt. Insgesamt wurden sieben Betonblöcke hergestellt. Der Beton wurde in einem Doppelwellenmischer hergestellt und mit einem Betonierkübel eingebaut. Die Probekörper wurden nach den Vorgaben des BAW-Merkblattes „Früher Zwang“ an den senkrechten Flächen bewehrt.

### **2.3 Wahl der Nachbehandlungsvarianten**

Bei der Nachbehandlung wurde der Zeitraum des Belassens in der Schalung (Primärmaßnahme) variiert. Es kamen Holzträger- und Stahlschalungen zum Einsatz. Die Schalldauer variierte zwischen einem und 14 Tagen. Zusätzlich wurden verschiedene baustellenübliche Sekundärmaßnahmen, die ein Austrocknen der Betonrandzone verringern sollen, angewendet. Im einzelnen waren dies wasserabführende Schalungsbahnen, Nachbehandlungsmittel, ein Abhängen mit feuchter Jute und Folie sowie ein regelmäßiges Befeuchten der Betonoberfläche nach dem Ausschalen.

### **2.4 Installation von Multiring-Elektroden und Temperatursensoren**

Die Temperaturänderungen in der Randzone wurden mittels tiefengestaffelt messender Temperatursensoren erfasst. Für die Beobachtung der Austrocknung der Probeflächen wurden in die Oberflächen Multiring-Elektroden (MRE) eingebaut. Die MRE messen den Elektrolytwiderstand zwischen jeweils zwei Elektrodenringen im Abstand von 5 mm bis in eine maximale Tiefe von etwa 90 mm zur Betonoberfläche. Über den Elektrolytwiderstand kann qualitativ auf Änderungen des Wassergehalts geschlossen werden.

### **2.5 Bohrkernuntersuchungen**

Um den Einfluss der eingesetzten Nachbehandlungsvarianten auf verschiedene dauerhaftigkeitsrelevante Betoneigenschaften zu untersuchen, wurde etwa 5 Jahre nach Betonherstellung begonnen, aus den einzelnen Betonflächen Bohrkern zu entnehmen und mit verschiedenen Prüfmethode zu untersuchen. Bei der Auswahl der Prüfmethode fanden dauerhaftigkeitsrelevante Betoneigenschaften Beachtung, die für den Verkehrswasserbau bedeutsam sind, und die verschiedene Transportvorgänge im Beton berücksichtigen. Der Schwerpunkt der durchgeführten Prüfungen liegt auf der Betrachtung der Betonrandzone. Es wurden die Karbonatisierungstiefe, der Wasseraufnahmekoeffizient, die Gaspermeabilität nach Torrent, die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und bei einem Druck von 150 bar, die Porengrößenverteilung mit der Quecksilberdruckporosimetrie und mittels Dünnschliffen, der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand im CIF- bzw. CDF-Test sowie der Chloridmigrationswiderstand untersucht.

## **3 Ergebnisse**

### **3.1 Auswertung der Messdaten**

Bei der Auswertung der Messdaten wurde der Schwerpunkt auf die ersten Tage nach der Herstellung gelegt. Die Auswertung und die grundsätzlichen Beobachtungen werden exemplarisch anhand der Temperaturdaten in Bild 1 erläutert. Mittels der Temperaturmessungen konnte sehr gut der anfängliche, durch frei werdende Hydratationswärme verursachte Temperaturanstieg in der Betonrandzone beobachtet werden. Nach etwa ein bis zwei Tagen wurde jeweils die Maximaltemperatur erreicht. Die Untersuchungen zeigen die durch ein verfrühtes Abnehmen der Schalung innerhalb sehr kurzer Zeiträume entstehenden starken Temperaturdifferenzen zwischen Randzone und Kern wodurch Auswirkungen auf die entstehenden Zwangsspannungen zu erwarten sind.

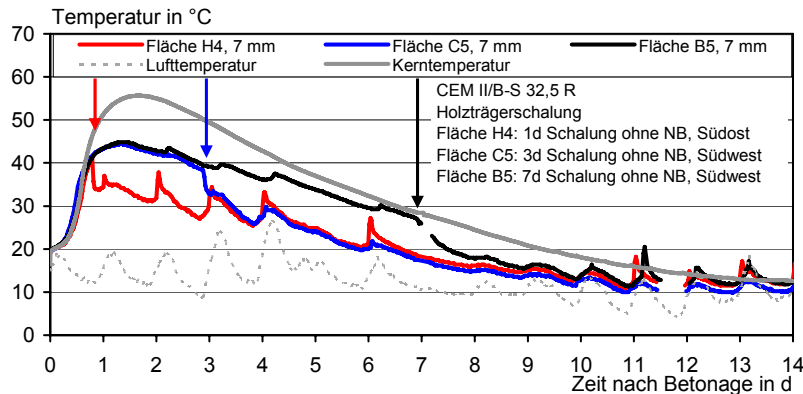


Bild 1: Entwicklung der Temperatur in der Betonrandzone bei unterschiedlicher Schalldauer

Darüber hinaus setzt nach dem Entschalen ein Austrocknungsvorgang ein. Dies äußert sich in einem Anstieg des Elektrolytwiderstandes. Der Anstieg des Elektrolytwiderstandes fällt umso deutlicher aus, je früher die Schalntafeln abgenommen werden. Besonders zu einem frühen Zeitpunkt reagiert der Beton hinsichtlich des Hydratationsfortschritts empfindlich auf einen Wasserverlust.

### 3.2 Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen

Derzeit werden die Untersuchungen an den Bohrkernen durchgeführt. Zur Einordnung des Einflusses der Nachbehandlung sind in Bild 2 der Permeabilitätskoeffizient, der Wasseraufnahmekoeffizient und der Chloridmigrationskoeffizient zur Beschreibung verschiedener Transportmechanismen in Abhängigkeit der Nachbehandlungsart und -dauer sowie die ermittelte Karbonatisierungstiefe dargestellt.

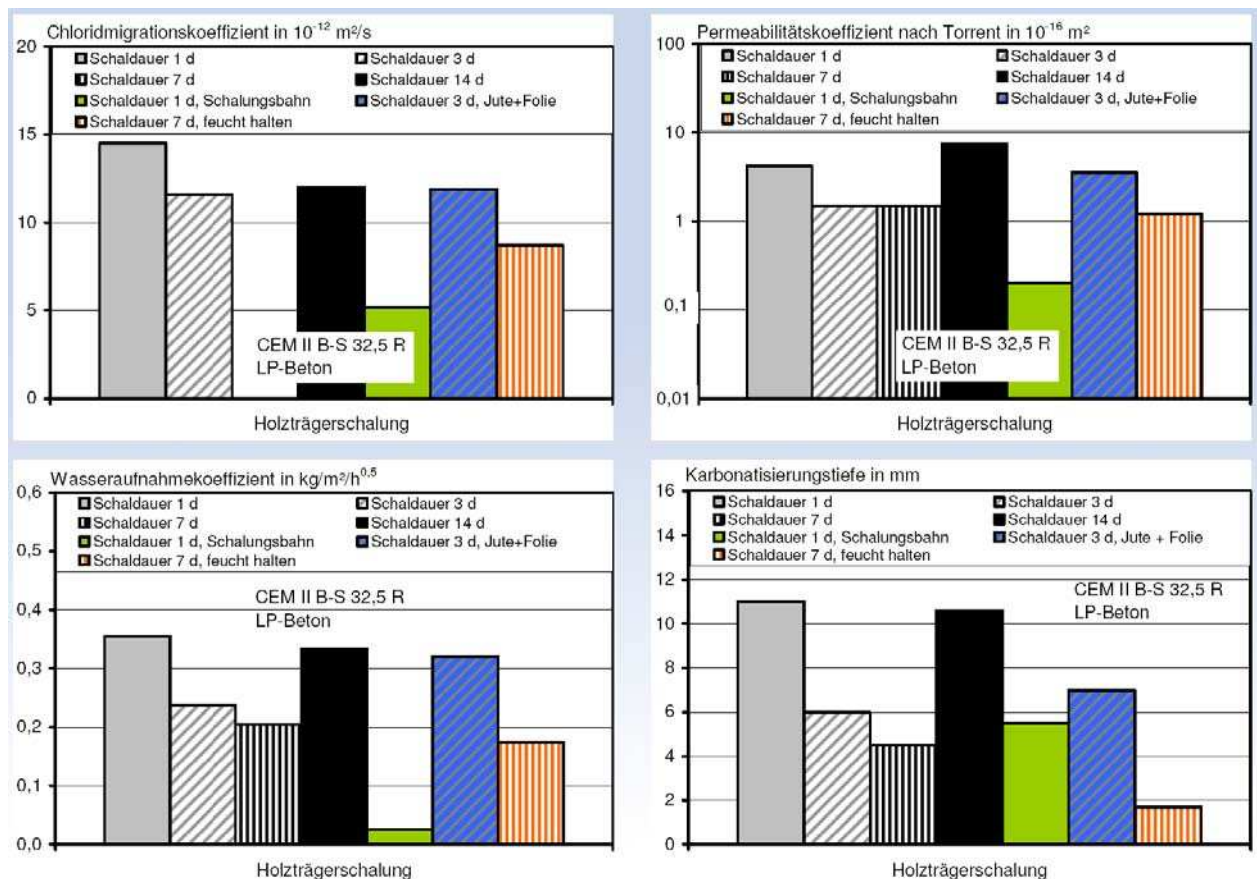


Bild 2: Erste Untersuchungsergebnisse in Abhängigkeit der Nachbehandlungsart und -dauer

Bei exemplarischer Betrachtung des Chloridmigrationskoeffizienten von etwa  $5 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s nach 1-tägiger Schalungsdauer und wasserabführender Schalungsbahn und der Varianten mit 3-tägiger Schalungsdauer und weiterer Sekundärmaßnahmen von etwa  $11 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s würde sich nach [4] bei einer Betonüberdeckung von 60 mm ein Zeitraum von 80 bzw. etwa 25 Jahren bis zur Depassivierung der Bewehrung ergeben. Durch die Wahl der Nachbehandlungsvariante ergäbe sich eine Verlängerung dieses Zeitraumes von etwa 50 Jahren. Eine Verkürzung der Schalldauer kann dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften wie beispielsweise den Karbonatisierungswiderstand ungünstig beeinflussen. Positive Effekte wurden durch die Verwendung wasserabführender Schalungsbahnen erzielt. Die Untersuchungen werden derzeit fortgeführt und anschließend im Hinblick auf einen etwaigen Änderungsbedarf der Regelungen zur Nachbehandlung gemäß ZTV-W LB 215 bzw. LB 219 bewertet.

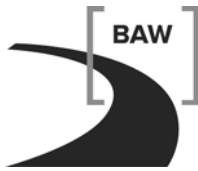
#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2010: Fortführung der Bohrkernuntersuchungen und Auswertung

2011: Erstellung des Abschlussberichtes

#### **5 Literatur**

- [1] DIN 1045-2:2008-08 – Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, Beuth Verlag GmbH Berlin
- [2] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215), Ausgabe 2004 + 1. Änderung Dezember 2008
- [3] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV W) für Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219), Ausgabe 2004 + 1. Änderung Dezember 2008
- [4] Bundesanstalt für Wasserbau: Merkblatt Chlorideindringwiderstand von Beton (BAW-Merkblatt "Chlorideindringwiderstand") (Ausgabe: Dezember 2004). Karlsruhe, Hamburg, Ilmenau : Bundesanstalt für Wasserbau, 2004



## **Adiabatische Wärmemessungen an ausgewählten Betonrezepturen**

**Netzplan-Nr.:** A39510310177

**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**

Eine starke Hydratationswärmeentwicklung bei der Betonage massiger Bauteile führt zu einer verstärkten Rissbildung im Beton. Im Beton für massige Wasserbauwerke soll daher gemäß ZTV-W LB 215 die Wärmeentwicklung durch Hydratation begrenzt werden. Dies erfolgt über eine Begrenzung der adiabatischen Wärmeentwicklung.

Über Vergleichsuntersuchungen an großformatigen Betonwürfeln sollen die neuen quasiadiabatischen Betonkalorimeter der Bundesanstalt für Wasserbau, welche systematisch für Kontrollprüfungen an Betonen für die Neubauvorhaben der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung genutzt werden, kalibriert werden.

Weitere Inhalte werden wegen ihrer Komplexität in einem neuen Forschungsvorhaben (Messverfahren Hydratationswärme) untersucht und sind nicht mehr Bestandteil dieses Forschungsvorhabens.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Bestimmung der adiabatischen Wärmeentwicklung betrifft alle Neubaumaßnahmen von massigen Betonbauteilen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung. Durch die adiabatische Wärmeentwicklung wird eine Anforderung an einen Beton für massige Bauteile beschrieben und als Abnahmekriterium definiert.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Eine Kalibrierung der Betonkalorimeter der BAW, die auch für Betonkalorimeter Dritter genutzt werden kann.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Zur Ermittlung der Wärmeentwicklung werden allseitig isolierte Betonwürfel hergestellt. Die Kubaturen der Würfel betragen  $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$ . Im Beton werden beim Einbau in einem 50 cm-Raster Temperaturmessfühler entlang der Mittelachsen installiert, die den Temperaturverlauf aufzeichnen. Zum Einsatz kommen auch verschiedene Messfühler, um die Genauigkeit der Messfühler untereinander zu vergleichen. Parallel werden Temperaturfühlereinstellungen und Messprogramme für das Kalorimeter erprobt. Der Verlauf der Festigkeitsentwicklung wird im Labor untersucht.

### **3 Ergebnisse**

Probekörper wurden im Herbst 2004 und in 2009 hergestellt. Der Temperaturverlauf wurde gemessen und aufgezeichnet. Anhand der 2009 durchgeführten Untersuchungen hat sich u.a. gezeigt, dass Thermoelemente als Messaufnehmer nicht geeignet sind. Die ZTV-W LB 215, Anlage 1, ist sowohl in diesem Punkt als auch im Hinblick auf die zulässigen Abweichungen innerhalb der gesamten Messkette zu präzisieren.

### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Der Fortgang der Untersuchungen ist abhängig von der Weiterentwicklung der neuen, derzeit im Bau befindlichen Betonkalorimeter der BAW.

Der Abschluss des Vorhabens ist für 2010 vorgesehen.

## **Chlorideindringwiderstand von Beton**

**Netzplan-Nr.:** A39510310231

**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**

Um die Widerstandsfähigkeit wasserbautypischer Betone und Instandsetzungsmaterialien gegen das Eindringen von Chloriden realistisch und vergleichbar bewerten zu können, wurde im Dezember 2004 das BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Beton“ herausgegeben. Damit wurde in Deutschland erstmals ein Performanceprüfverfahren sowie die Vorgehensweise zur Abschätzung der Dauerhaftigkeit von Wasserbauwerken bei chloridinduzierter Bewehrungskorrosion in einem Regelwerk festgeschrieben.

Das Verfahren wurde bezüglich der Probenvorbereitung, des Probenalters, der anzulegenden Spannungsdifferenz, der Prüfzeiten sowie der Abnahmekriterien auf die Anforderungen des Wasserbaus abgestimmt. Anhand des ermittelten Migrationskoeffizienten erfolgt eine Zuordnung zu den in DIN 1045 definierten Expositionsklassen XS1..3 bzw. XD1..3. Einige Problembereiche, wie beispielsweise die Berücksichtigung weiterer Prüfverfahren, wurden in dieser ersten Fassung jedoch noch ausgeklammert und sollen nun im Rahmen einer Erweiterung des Merkblattes Berücksichtigung finden. Darüber hinaus sind die Modellparameter im Hinblick auf das Sicherheitsniveau der Dauerhaftigkeitsbemessung den aktuellen Erfordernissen anzupassen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Dauerhaftigkeit von Wasserbauwerken im Meerwasserbereich wird maßgeblich von der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion bestimmt. Nur durch eine präzise Abschätzung des Chlorideindringwiderstands in Verbindung mit entsprechenden Bewertungs- und Planungshinweisen kann sichergestellt werden, dass die Bewehrung während der für Verkehrswasserbauwerke mit i.d.R. 100 Jahren veranschlagten planmäßigen Nutzungsdauer vor Korrosion geschützt bleibt, bzw. Instandsetzungssysteme den erforderlichen Korrosionsschutz bieten.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Im Rahmen dieses FuE-Vorhabens sollen verschiedene Erweiterungen in das BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Beton“ integriert werden. Diese betreffen sowohl die Überprüfung der Berechnungsgrundlagen unter Einbeziehung bereits gesammelter Erfahrungen sowie vorhandener Prüfergebnisse, als auch versuchstechnische Grundlagenuntersuchungen zur Verbesserung der Möglichkeiten einer Dauerhaftigkeitsbemessung durch den Planer. Entsprechende Bemessungsdiagramme sind anzupassen bzw. neu zu erarbeiten. Im Rahmen der versuchstechnischen Grundlagenuntersuchungen soll darüber hinaus die Möglichkeit geschaffen werden, Prüfwerte anderer Prüfverfahren direkt mit den Werten bei Prüfung mittels Migrationsverfahren zu vergleichen bzw. diese umzuwerten.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Im Rahmen numerischer Simulationen sind die entsprechenden Bemessungsdiagramme zu überarbeiten (Anpassung des Sicherheitsniveaus, Bemessung für mehrschichtige Systeme bei Berücksichtigung verbleibender Altbetondicken), sowie vorhandene Parameter anzupassen. Des Weiteren wird eine Vorgehensweise zur Umwertung von Prüfwerten der Migrationsprüfung zu solchen bei Prüfung nach anderen möglichen Prüfverfahren entwickelt. Das für die Simulationen erforderliche Eindringverhalten von Altbetonen und Instandsetzungsmaterialien wird durch die Bestimmung des Chloridprofils an bestehenden Bauwerken sowie Nutzung der im Rahmen einer Laborvergleichsuntersuchung anfallenden Daten charakterisiert.



### 3 Ergebnisse

Um die zugrunde gelegten Modellparameter der Dauerhaftigkeitsbemessung auf ein angemessenes Sicherheitsniveau ( $\beta = 1,5$ ) anzupassen, wurden von der Technischen Universität München vollprobabilistische Dauerhaftigkeitsbemessungen zum Chlorideindringen unter pessimistischen Expositionsbedingungen (u. a. Wasserwechselzone und Spritzwasserzone von Meerwasserbauwerken) durchgeführt. Insgesamt erfolgten Berechnungen für sechs für den Verkehrswasserbau typische Betonrezepturen, wobei im Hinblick auf die notwendige Nutzungsdauer auch die Betondeckung zwischen 50 und 70 mm variiert wurde. Für die Bewertung erfolgte eine vergleichende Darstellung der Zuverlässigkeit  $\beta$  über der Zeit  $t$  für die verschiedenen Parameter. Im folgenden Bild ist ein Ergebnis exemplarisch für die Spritzwasserzone bei einer Betondeckung von 60 mm dargestellt.

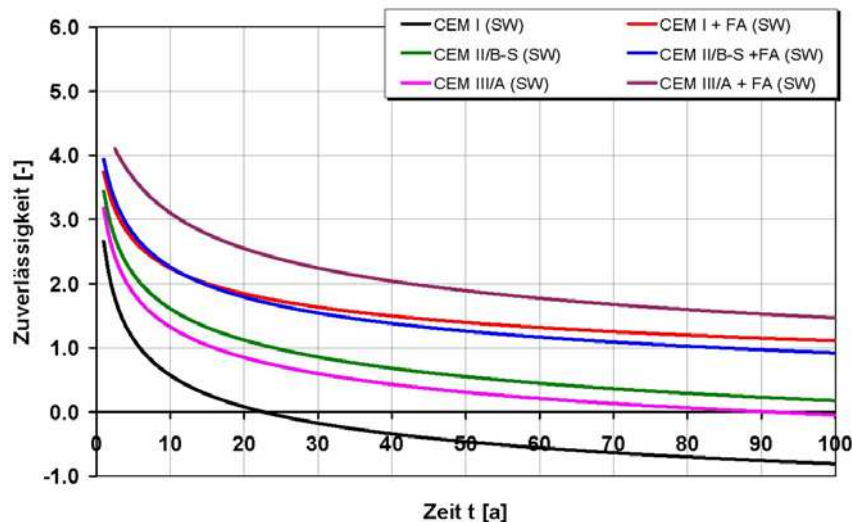


Bild 1: Ergebnisse der Modellierung der Zuverlässigkeit für Betone in der Wasserwechselzone

Die Berechnungen ergaben, dass die Bindemittelart den größten Einfluss besitzt. Während reiner Portlandzementbeton für die Expositionsklasse XS3 ungeeignet ist, können mit der Kombination von Hochofenzement und Flugasche ausreichende Chlorideindringwiderstände erreicht. Durch eine Erhöhung der Betondeckung um 10 mm können mit solchen Bindemittelkombinationen Lebensdauern von 100 Jahren mit ausreichender Sicherheit ( $\beta = 1,5$ ) erreicht werden.

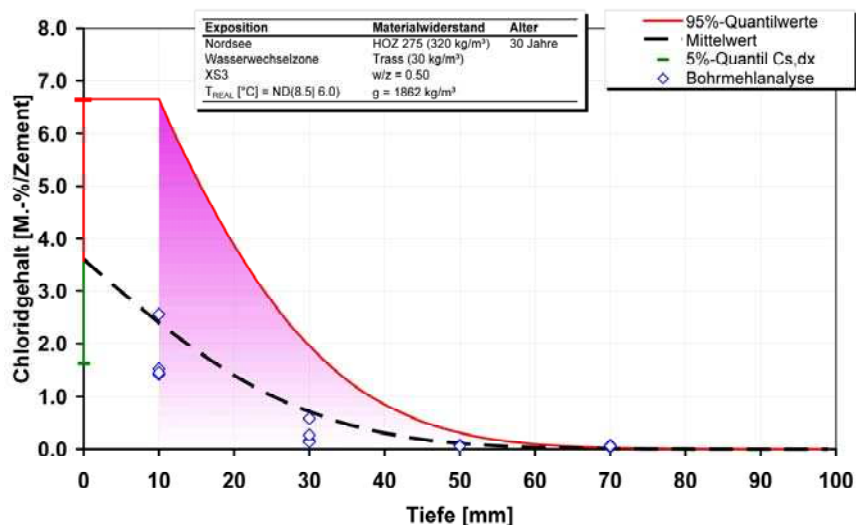
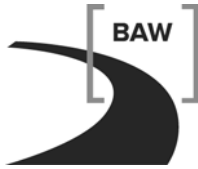


Bild 2: Modelliertes und gemessenes Chloridprofil für ein Bauteil in der Wasserwechselzone



Um die Berechnungsergebnisse zu validieren, wurden Chloridprofile für reale Meerwasserbauwerke unter konkreten Annahmen vorhergesagt und anschließend durch Aufnahme von Chloridprofilen an den Bauwerken überprüft. Bei der Simulationsrechnung wurden jeweils das Alter, die Betonzusammensetzung sowie der Ort und die Exposition des Bauteils berücksichtigt. Wie das Bild für ein 30 Jahre altes Bauwerk an der Nordsee zeigt, stimmt die Modellierung (Mittelwert) sehr gut mit dem tatsächlich vorhandenen Chloridprofil (Bohrmehlanalyse) überein.

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

2010: Die Bemessungsansätze zum Chlorideindringen im BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Beton“ sowie die deskriptiven Vorgaben zur Betonzusammensetzung sind anhand numerischer Simulationen anzupassen.

Anpassung eines im Rahmen des FuE-Vorhaben entwickelten Bemessungsansatzes zur Beschreibung des Chlorideindringens in ein 2-Schichtsystem.

2011: Abschluss des Vorhabens

## **Injektion von Hohlräumen hinter einer 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.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Ergebnisse werden derzeit zusammen gestellt. Der Abschlussbericht soll bis Mitte 2010 vorliegen.

### 5 Literatur

- [1] Müller, H. : Ertüchtigung von Schleusenammerwänden mit Klinkervorsatzschalen durch Injektionen, Teil 1: Bauwerkssituation, Problemstellung, Untersuchungskonzept. In: Kolloquium „Erhaltung von Bauwerken, Technische Akademie Esslingen, Ostfildern, 28. Januar 2009.



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

**Textilbewehrte Vorsatzschalen zur Instandsetzung von Betonbauteilen****Netzplan-Nr.:** A39510310238**Projektleiter:** BDir. 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**

Ältere, in der Regel unbewehrte oder teilbewehrte Wasserbauwerke aus Beton zeigen vielfach vor Ablauf der rechnerischen Nutzungsdauer Oberflächenschäden, die vorwiegend aus Abrasion, frostbedingtem Betonabtrag und Rissbildungen herrühren. Oftmals soll die Nutzungsdauer derartiger Wasserbauwerke im Rahmen von Grundinstandsetzungen verlängert werden. Vorrangiges Ziel ist hier die Herstellung eines dauerhaften Betons im oberflächennahen Bereich. Eine Möglichkeit hierzu ist die Anordnung einer Vorsatzschale (zumeist nach vorhergehendem Betonabtrag), wobei gemäß ZTV-W LB 219 (2004) zwischen dünnen Vorsatzschalen (bis 60 mm, unverankert, unbewehrt, Verbund zum Altbeton ausschließlich über Adhäsion) und dicken Vorsatzschalen (über 90 mm bis maximal etwa 500 mm, im Altbeton verankert, ein- oder zweiseitig bewehrt) unterschieden werden kann. Während für die Instandsetzung beispielsweise von Schleusenammerwänden aufgrund spezifischer Randbedingungen eher dicke Vorsatzschalen geeignet erscheinen, bieten sich für Bauwerke wie Wehranlagen unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten zumeist dünne Vorsatzschalen an.

Bei der Anordnung dünner, unbewehrter Vorsatzschalen auf geringer festen Altbetonen älterer Wasserbauwerke ist allerdings davon auszugehen, dass sich im Altbeton vorhandene Risse und offene Arbeitsfugen nach der Instandsetzung in die Vorsatzschale fortpflanzen. Zudem können in oftmals vorhandenen lokalen Bereichen mit besonders geringen Abreißfestigkeiten des Altbetons Verbundprobleme auftreten. Die Verwendung konventioneller Bewehrung aus Stahl in Verbindung mit Verankerungselementen zur Kompensation dieser Problematik ist bei dünnen Vorsatzschalen wegen des nicht realisierbaren Korrosionsschutzes (zu geringe Betondeckung) zumeist nicht zielführend. Durch die Verwendung korrosionsunkritischer Textilbewehrung könnte diese Problematik umgangen werden.

**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 zielsicherer und kostengünstiger als bisher realisieren ließen.

**1.3 Untersuchungsziel**

Im Rahmen einer Studie sollen zunächst die Potentiale, Grenzen und offenen Fragen beim Einsatz von Textilbewehrung zur Instandsetzung massiver Wasserbauwerke untersucht werden. Sofern sich dieser Ansatz grundsätzlich als zielführend erweist, sollen in weiteren Schritten Rahmenbedingungen für die Anwendung dieser Bauweise in der WSV definiert werden. Hierzu sind entsprechende Labor- und Bauteiluntersuchungen erforderlich.

**2 Untersuchungsmethoden**

Das Forschungsvorhaben soll in drei nacheinander zu bearbeitende Teile gegliedert werden:

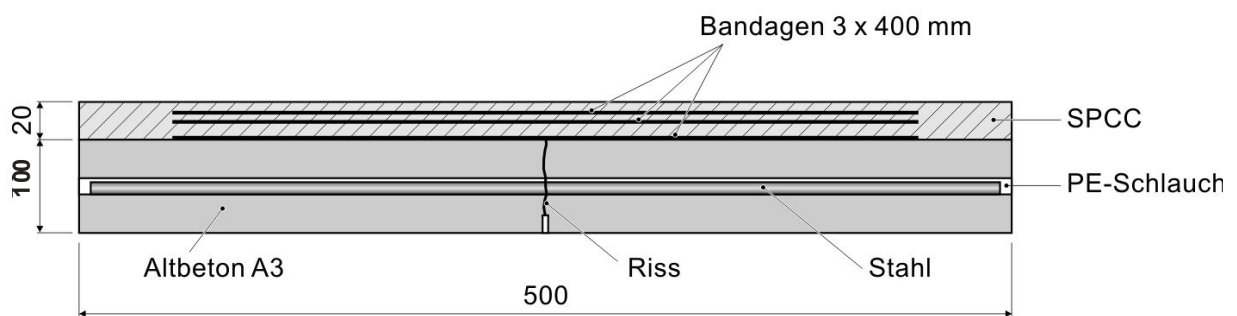
**Teil 1:** Studie zur Analyse des grundsätzlichen Potentials textilbewehrter Vorsatzschalen**Teil 2:** Untersuchungen auf Laborebene

In Teil 2 des FuE-Vorhabens soll die Eignung dünner textil- bzw. faserbewehrter Spritzmörtel für die Instandsetzung der Betonbauteile von Verkehrswasserbauwerken untersucht werden. Hierbei werden drei Lösungsansätze verfolgt:

- Kombination von Spritzmörtel gemäß ZTV-W LB 219, Abschnitt 5, mit textilen Bandagen
- Verwendung von Spritzfasermörtel ohne textile Bandagen
- Verwendung von Spritzfasermörtel mit textilen Bandagen

Der Auftrag zur Durchführung der entsprechenden Laboruntersuchungen wurde in 2008 an das ibac erteilt, weitere Untersuchungen zum Einsatz von Spritzmörteln mit ganzflächiger Textilbewehrung sollen folgen.

Basis des ersten Abschnittes des Versuchsprogramms sind Rissüberbrückungsversuche. Hierzu werden die in Bild 1 dargestellten Rissüberbrückungsproben hergestellt. Die Rissüberbrückungsproben bestehen aus dem Grundkörperbeton A3 nach ZTV-W LB 219 und haben eine Breite von 120 mm. In Abstimmung mit den Herstellern der Spritzmörtel variiert die Spritzmörtelschicht zwischen 20 und 30 mm.



Maße in mm

*Bild 1: Aufbau der Rissüberbrückungsproben*

Der Riss im Grundkörper wird bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte anhand einer Zugkraft zyklisch geöffnet und geschlossen. Die kleinste Rissbreite beträgt ca. 0,1 mm. Basierend auf einer Rissbreitenänderung von ca. 0,6 mm wird die größte Rissbreite etwa 0,7 mm betragen. Nach einer Belastung mit bis zu 500 Zyklen wird der Riss bis zum Versagen des Probekörpers geöffnet.

**Teil 3:** Untersuchungen im Bauteilmaßstab

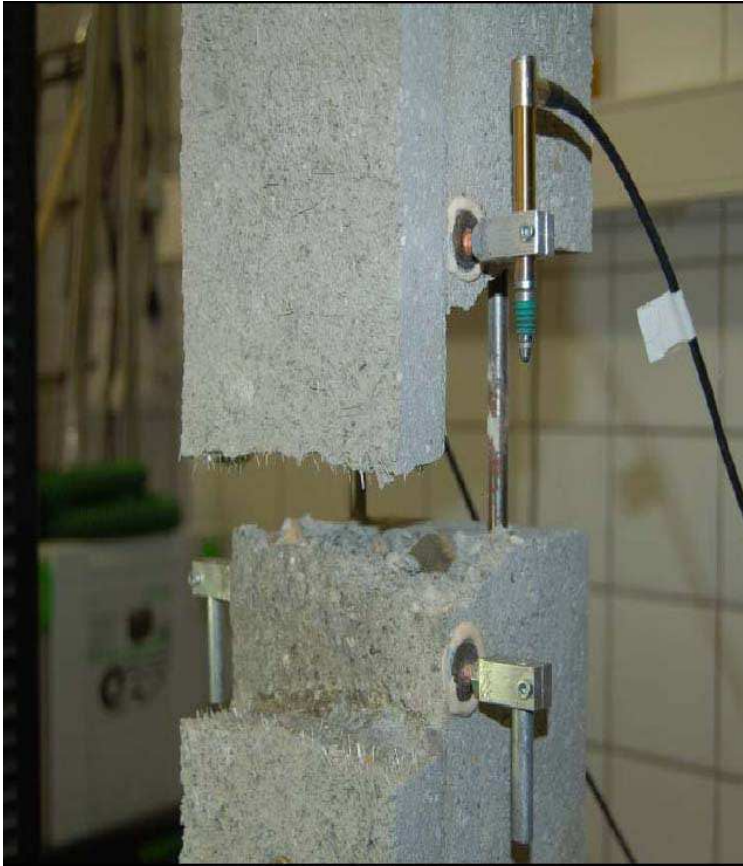
### 3 Ergebnisse

**Teil 1:** Das Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen wurde im August 2006 mit der Erarbeitung einer Potentialanalyse gemäß Teil 1 des Untersuchungsprogramms beauftragt. Diese Studie wurde im Sommer 2007 vorgelegt. Die Studie geht u. a. auf die Materialien des Textilbetons und deren Zusammenwirken ein. Des Weiteren wird die Dauerhaftigkeit typischer technischer Textilien bei Verwendung in Beton allgemein sowie unter den besonderen Bedingungen des Wasserbaus betrachtet. In einem weiteren Schritt werden denkbare Einsatzbereiche für Textilbetone im Wasserbau aufgezeigt und mögliche Ausführungsvarianten dünn-schichtiger, textilbewehrter Spritzmörtel und textilbewehrter Vorsatzschalen dargestellt. In diesem Zusammenhang zu beantwortende Fragestellungen werden aufgezeigt.

**Teil 2:** Die in Bild 1 dargestellte Versuchsanordnung zur Prüfung des Rissüberbrückungsvermögens wurde seitens des ibac konzipiert und mit ausgewählten Materialien getestet. Mit den Herstellern der Materialien, die in die Untersuchungen einbezogen werden sollen, wurden Vorgespräche geführt. Die Herstellung der Rissüberbrückungsproben erfolgte ab Frühjahr 2009 in Spritzständen der Materialhersteller.



Im 1. Schritt wurde ein S-A3-Mörtel gemäß ZTV-W LB 219 in Verbindung mit drei unterschiedlichen Textilien untersucht (Bild 2). Fazit des 1. Schrittes war, dass der SPCC im Bereich des Risses vom Untergrund getrennt werden muss, um eine Rissverteilung erreichen zu können (Erhöhung der „freien“ Dehnlänge der bewehrten SPCC-Schicht).



*Bild 2: Exemplarische Darstellung der Rissüberbrückungsversuche*

In einem 2. Schritt wurde ein S-A4-Mörtel in Verbindung mit Carbon-Textilien einerseits und mit AR-Glasfasern andererseits untersucht. Zur Trennung des SPCC vom Untergrund im Bereich des gerissenen Untergrundes wurden ca. 10 cm breite Teflonfolienstreifen auf den Untergrund geklebt. Zum Vergleich der Wirkweise des Teflonbandes wurden 2 Rissüberbrückungsprismen mit und 2 Prismen ohne hergestellt. Die besten Ergebnisse wurden mit den Carbon-Textilien in Kombination mit der Teflonfolie erzielt (3 Risse).

In einem 3. Schritt werden die Textilien mit Epoxidharz getränkt, um die inneren Filamente der Textilien am Lastabtrag zu beteiligen. Außerdem wird zu Vergleichszwecken ein feinmaschiges Drahtgewebe in die Untersuchungen einbezogen

**Teil 3:** ---

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

2010: Fortführung der Laboruntersuchungen gemäß Teil 2

2011: Durchführung von Probemaßnahmen an Bauwerken (soweit verfügbar)

2012: Abschluss des FuE-Vorhabens, Erstellung FuE-Bericht.

## **Dauerhaftigkeitsbemessung von Wasserbauwerken**

**Netzplan-Nr.:** A39510310240

**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**

Die Dauerhaftigkeit neu zu erstellender Bauwerke wird nach derzeitigem Regelwerk (DIN EN 206 / DIN 1045-2) durch die Einhaltung von bestimmten, auf Erfahrungswerten beruhenden Mindestanforderungen an die Betonzusammensetzung und die Betondruckfestigkeit sichergestellt. Die Anforderungen der Norm sind jedoch derzeit nur auf eine Lebensdauer von 50 Jahren ausgelegt, Wasserbauwerke aber i. d. R. auf 100 Jahre zu bemessen. Für eine realistische Abschätzung und Sicherung der Dauerhaftigkeit sind daher 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 [1], [2], als auch im Rahmen der europäischen Normungsarbeit [3] nachgegangen. Erste Planungsgrundlagen zur Abschätzung der Dauerhaftigkeit bei chloridinduzierter Bewehrungskorrosion, welche auf einer probabilistischen Lebensdauerbemessung basieren, wurden bereits im BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Beton“ festgeschrieben.

#### **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 Zustandentwicklung soll eine wirtschaftlich optimierte und nachhaltige Bauwerksunterhaltung und –instandsetzung ermöglicht werden. Grundlage dafür sind entsprechende Schadensentwicklungsmodelle, welche im Rahmen des FuE Projekts 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 Lebens- bzw. 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 begleitet zwei universitäre Forschungsprojekte mit dem Ziel, entsprechende Bemessungskonzepte unter besonderer Berücksichtigung wasserbauspezifischer Beanspruchungen zu erarbeiten. Im ersten Schritt soll eine grundsätzliche Wertung möglicher wasserbaurelevanter Schädigungsmechanismen erfolgen. Besonderes Augenmerk gilt dabei dem Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand, dem Verschleißwiderstand sowie dem Widerstand gegen das Eindringen von Chloriden.

Für die wesentlichen Mechanismen sind geeignete Schädigungsmodelle auszuwählen und hinsichtlich ihrer Eignung zu untersuchen. Eine Kalibrierung der Modelle soll dabei u. a. durch die Untersuchung an Wasserbauwerken erfolgen. Auf der Basis geeigneter Schädigungsmodelle sind schließlich Bemessungsansätze zu erarbeiten, die bei gegebenen Betoneigenschaften eine realistische Bewertung der Lebens- bzw. Nutzungsdauer/Restnutzungsdauer ermöglichen.



Um die tatsächliche Leistungsfähigkeit der Baustoffe zu bewerten, sind nach Möglichkeit geeignete Performance-Prüfungen zu verwenden bzw. zu konzipieren.

### 3 Ergebnisse

Die BAW begleitet das DAfStb-Verbundvorhaben „Nachhaltig Bauen mit Beton“, Teilprojekt D „Lebensdauermanagement“, über das Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der UNI Stuttgart. Neben der fachlichen Zusammenarbeit (Einbringen wasserbauspezifischer Anforderungen, u. a. Nutzung BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand“; Zuarbeit typischer Betonkennwerte und Bauwerksdaten) nahm die BAW an den Statusseminaren teil, und besitzt Zugriffsrecht auf die Projektdaten. Das Vorhaben wurde im Jahr 2009 mit der Entwicklung eines Software-Prototypen für ein prädiktives Lebensdauermanagementsystem (PLMS) beendet, der aktuelle Entwicklungsstand ist in [4] ausführlich dokumentiert. Die Software ist die wesentliche Grundlage für die spätere Entwicklung eines kommerziell verfügbaren Systems, mit welchem der aktuellen Zustand von Infrastrukturbauwerken erfasst und eine Lebensdauerprognose erstellt werden kann. Die Zuverlässigkeit der Zustandsprognose kann während jeder Lebenszyklusphase zugeschärft werden. Das Grundprinzip ist im nachfolgenden Bild verdeutlicht.

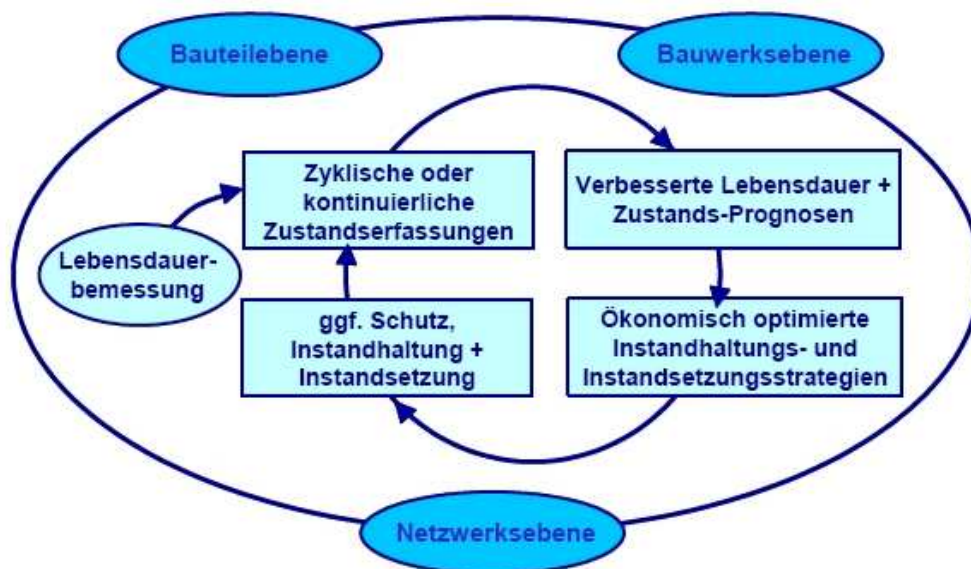


Bild 1: Prinzipdarstellung prädiktives Lebensdauermanagementsystem (PLMS)

Die Ergebnisse des gesamten DAfStb-Verbundvorhabens „Nachhaltig Bauen mit Beton“ werden im Frühjahr 2010 in der Schriftenreihe des DAfStb veröffentlicht.

Zum Projekt Chlorideindringwiderstand wurden vom IWB im Rahmen numerischer Simulationen Zuverlässigkeitsbetrachtungen vorgenommen. Daraus ergab sich Handlungsbedarf in Form einer notwendigen Änderung der Bemessungsansätze im BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Beton“ (Festlegung eines angemessenen Sicherheitsniveaus). Diese konkrete Fragestellung gehört thematisch zum FuE-Projekt „Chlorideindringwiderstand von Beton“, A39510310141, und wird daher im Rahmen dieses Projektes bearbeitet werden.

Im Zusammenhang mit einem von der UNI Karlsruhe entwickelten Performance-Prüfverfahren für den Verschleißwiderstand wurde auch ein entsprechendes Prüfgerät konstruiert. Dieses hat sich als geeignet erwiesen und soll für die BAW beschafft werden, um künftig entsprechende Performance-Prüfungen zum Abrasionswiderstand durchführen zu können. Für den Bau des Prüfgerätes sowie die damit geplanten Untersuchungen wurde ein eigenes Forschungsvorhaben „Hydroabrasion“ begonnen.

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

2010: Da das DAfStb-Verbundvorhaben „Nachhaltig Bauen mit Beton“ in 2009 beendet wurde, und zu den Fragestellungen Chlorideindringwiderstand und Hydroabrasion eigenständige Forschungsvorhaben begonnen wurden, wird das Vorhaben in 2010 beendet.

#### **5 Literatur**

- [1] Reinhardt, H.-W.; Brameshuber, W.; Graubner, C.-A. (et al.): Sachstandbericht Nachhaltig Bauen mit Beton. - Berlin: Beuth, 2001. - (DAfStb: Schriftenreihe 521). - ISBN 3-410-65721-5.
- [2] DAfStb-Verbundvorhaben „Nachhaltig Bauen mit Beton – Projektphase 2“, Teilprojekt D „Lebensdauermanagement“, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2006.
- [3] fib Model Code for Service Life Design (fib MC-SLD), fib Task-Group 5.6, Entwurf 2006.
- 4] Hegger; Dreßen; Schließl; Gehlen; Zintel; Mayer; Kessler; Rank; Lukas; Borrmann; Hauer; Wiens: Beton - Nachhaltiges Bauen im Lebenszyklus. Bauingenieur, Band 84, Juli/August 2009, S. 304-312.

## **Ausbildung von Arbeitsfugen**

**Netzplan-Nr.:** A39510310313

**Projektleiter:** BDir. 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**

Beton- und Stahlbetonbauwerke können i. d. R. nicht in einem Arbeitsgang hergestellt werden. Da das Betonieren „frisch in frisch“ in vielen Fällen nicht möglich ist, entstehen zeitlich getrennte Betonierabschnitte. Damit eine ausreichend kraftschlüssige und dauerhafte Verbindung zwischen einem bereits erhärteten und einem neu anbetonierten Beton herbeigeführt und alle dort auftretenden Beanspruchungen sicher aufgenommen werden können, bedarf es einer geeigneten Ausbildung der Arbeitsfuge. Hierfür können verschiedene Ansätze wie das Freilegen des Grobkorngerüstes des erhärteten Betons durch Wasserstrahlen oder die Verwendung von Streckmetall gewählt werden. Eine neue Variante wäre ggf. die Verwendung von Verzögerern. Im Rahmen des FuE-Vorhabens sollen insbesondere nachfolgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Rautiefen werden allein durch Hochdruckwasserstrahlen der Arbeitsfugen erreicht? Welchen Einfluss hat hierbei der Erhärtungszustand des Betons? Wie unterscheiden sich die Ergebnisse bei einer Vorbehandlung der Arbeitsfugen mit Verzögerungsmitteln von denen bei konventionell vorbehandelten Arbeitsfugen?
- In welchem Bereich liegt die Rautiefe, mit der die höchsten Verbundeigenschaften erzielt werden kann?
- Welche Verzögerungszeiten ergeben sich in Abhängigkeit der Dosierung des Verzögerungsmittels bzw. seiner Rohstoffbasis?
- Wie lässt sich die erforderliche Rautiefe in Kombination mit dichter Bewehrung und Abdichtungselementen wie z.B. Fugenband/ -blech einstellen?
- Ist eine ausreichende Verträglichkeit zwischen Verzögerungsmittel und Bewehrung/ Abdichtungselementen gewährleistet? Kann sich der unbeabsichtigte Auftrag dieser Mittel evtl. negativ auf die Verbundwirkung von Beton und Bewehrung/ Fugenband auswirken?
- Wie wirkt sich der Verbleib bzw. das Entfernen eines Streckmetallelements auf die Verbundeigenschaften aus? Welchen Einfluss übt die Maschenweite von Abschalelementen auf den Verbund aus?
- Mit welchen Prüfverfahren lässt sich der Zustand der Arbeitsfuge (Rauigkeit) beschreiben (Konzept für baustellentaugliches Nachweisverfahren)?

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Arbeitsfugen in Betonbauteilen sind potentielle Schwachstellen innerhalb des Betongefüges. Eine nicht fachgerechte Ausbildung derartiger Arbeitsfugen kann sowohl unter statischen als auch unter dauerhaftigkeitsspezifischen Aspekten problematisch sein. Die Beurteilung der fachgerechten Arbeitsfugenausbildung bildet einen immer wiederkehrenden Anlass zu Streitigkeiten zwischen Auftraggeber (WSV-Dienststellen) und bauausführenden Firmen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel dieses Forschungsprojekts ist es, zunächst durch eine entsprechende Literaturrecherche und anschließend durch Laboruntersuchungen Antworten auf die genannten Fragestellungen zu finden. Auf dieser Basis sollen Kriterien, Prüfverfahren und ggf. Grenzwerte abgeleitet werden, die in ein Qualitätssicherungskonzept für die Arbeitsfugenausbildung Eingang finden können.

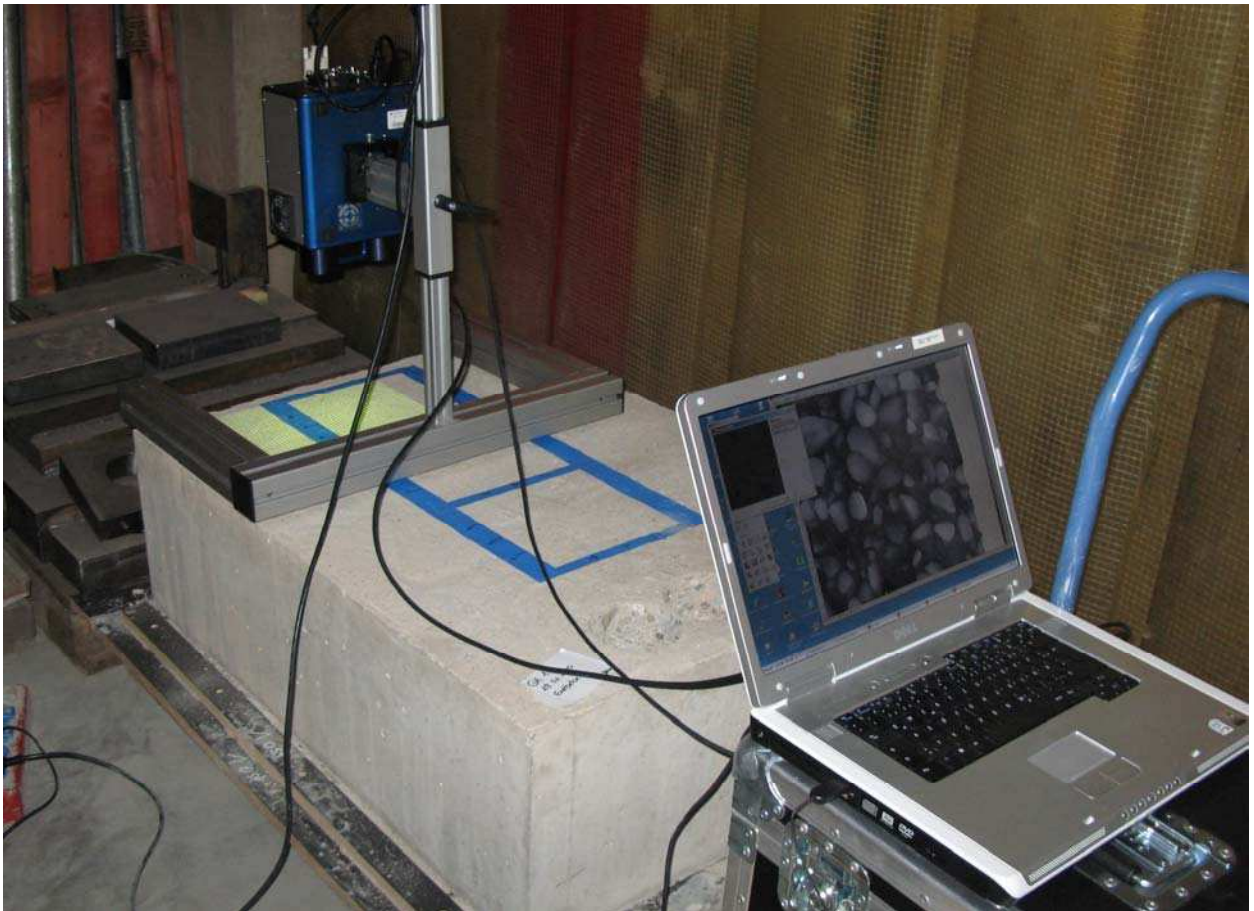
## 2 Untersuchungsmethoden

Die Bearbeitung des Vorhabens ist in zwei Teilschritte gegliedert, welche beide durch die Universität Bochum / Prof. Breitenbücher realisiert werden sollen:

Teil A: Erstellen eines Sachstandsberichtes zur Thematik

Teil B: Durchführung von Untersuchungen an großformatigen Probekörpern im Labor

Ergänzend sollen durch die Fachhochschule Frankfurt / Prof. Schulz an ausgewählten Arbeitsfugenflächen Untersuchungen zur Beurteilung der Rauigkeit mittels Streifenlicht- und Laserprofilmessung durchgeführt werden (Bild 1).



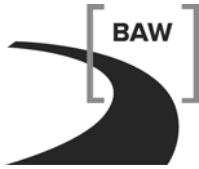
*Bild 1: Anwendung Streifenlichtverfahren an großformatigem Laborprüfkörper*

## 3 Ergebnisse

### Teil A: Sachstandsbericht

Der Sachstandsbericht "Ausbildung von Arbeitsfugen in Wasserbauwerken" liegt vor. Er gibt einen Überblick über mögliche und notwendige Maßnahmen zur sachgerechten Ausbildung von Arbeitsfugen in massiven Wasserbauwerken. Nach einer Darstellung der Problematik werden hier folgende Aspekte erörtert:

- Planung von Arbeitsfugen
- Ausführung von Arbeitsfugen
  - Vertikale Arbeitsfugen
  - Horizontale Arbeitsfugen
  - Vorbehandlung der Anschlussfläche
  - Anschlussmischungen für horizontale Arbeitsfugen



- Einbringen des Zweitbetons
- Nachbehandlung der Anschlussfläche
- Abdichtungssysteme für Arbeitsfugen
- Qualitätsrelevante Maßnahmen

#### **Teil B: Untersuchungen an großformatigen Probekörpern im Labor**

Die großformatigen Probekörper werden zur Zeit hergestellt. Die ergänzenden Messungen der FH Frankfurt sind durchgeführt worden.

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

2010: Fortführung und Abschluss der Laboruntersuchungen, Auswertung der Messungen der FH Frankfurt, Erstellung des Abschlussberichtes

## **Überarbeitung des Turbulenzprüfverfahrens für Geokunststoffe**

**Netzplan-Nr.:** A39510370001

**Projektleiter:** 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**

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 wird zurzeit auf CEN und ISO Ebene als Normentwurf vorbereitet. 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. 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 soll 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 marktüblichen Geokunststoffprodukten wurde zunächst die mechanische Filterwirksamkeit mit dem Turbulenzverfahren in Abhängigkeit verschiedener Prüfböden untersucht. Für diese Untersuchungen wurden geotextile Vliesstoffe aus Stapelfasern und Endlofasern herangezogen. Bild 1 zeigt eine Auswahl der gewählten Prüfböden. Zur Dokumentation für die internationale Normungsarbeit wurde ferner der aus Bild 2 ersichtliche Prüfboden Botany Bay eingesetzt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden bei der CEN TC 189 WG 4 Sitzung in Mailand im Mai 2008 diskutiert. Für den ISO Normentwurf wurde festgelegt, dass aufgrund des signifikanten Bodendurchgangs zukünftig der Prüfboden ST4 der BAW verwendet werden soll.



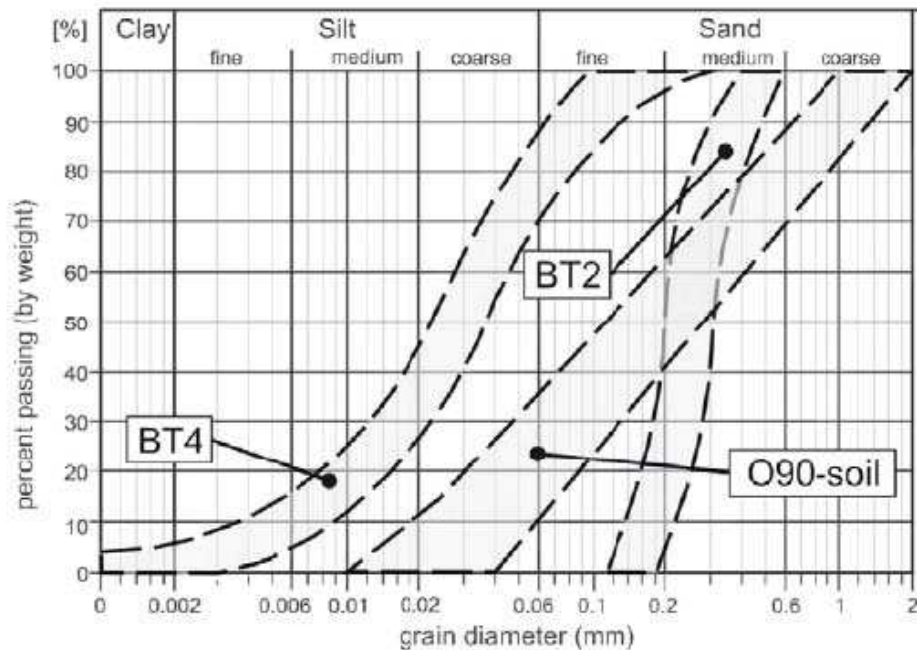


Bild 1: Kornverteilungen von ausgewählten Prüfböden

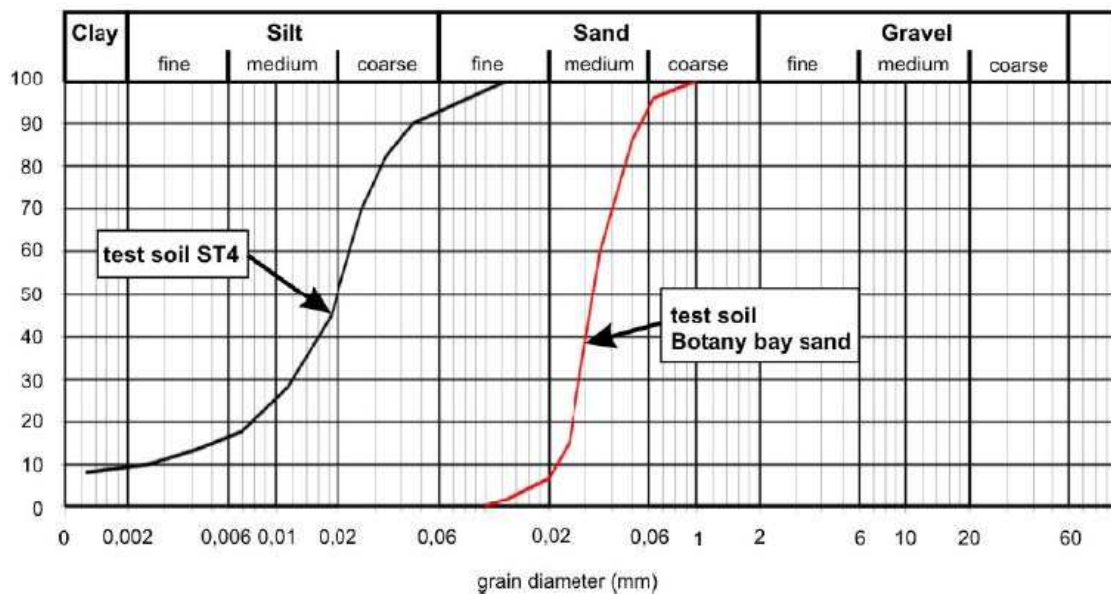


Bild 2: Kornverteilungen des Prüfbodens ST 4 und dem Testboden Botany bay

In Sidney wurden 1994 bei einer ins Meer gebauten Landebahn nach der Inbetriebnahme Bodenverluste und Senkungen festgestellt, die einen erheblichen finanziellen Schaden verursachten. Das eingesetzte Geotextil wurde seinerzeit nach Untersuchungen mit einem Prüfverfahren für laminare Strömung ausgewählt. Mit der Vorstellung der o. g. Untersuchungen und der Veröffentlichung der Ergebnisse im Rahmen der Konferenz GeoAmericas wurde die Bedeutung für ein international genormtes Prüfverfahren für Geokunststoffe unter turbulenten Strömungen dokumentiert. Bild 3 zeigt die graphische Darstellung des kumulativen Bodendurchgangs für eine Auswahl handelsüblicher Produkte aus Endlosfasern unter turbulenter Strömung.

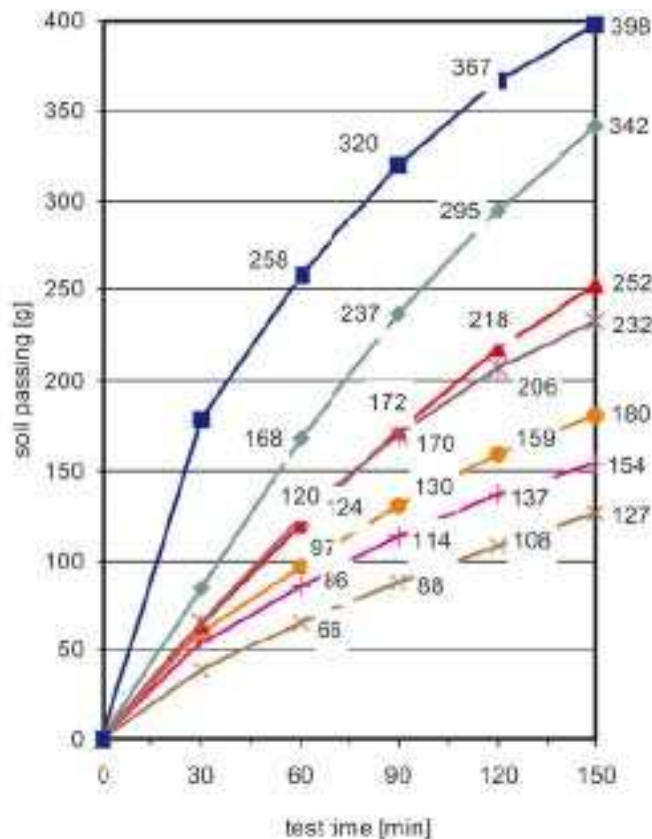


Bild 3: Bodendurchgang von handelsüblichen Endlosfaserprodukten

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2010: Mit der heutigen Versuchseinrichtung soll an marktüblichen Materialien der Einfluss der Verdichtung des Prüfbodens und der Versuchsdauer in Abhängigkeit von verschiedenen turbulenten Belastungen untersucht werden. Einbau eines regelbaren Elektromotors in die derzeitige Versuchseinrichtung. An handelsüblichen Produkten soll die mechanische Filterwirksamkeit in Abhängigkeit der turbulenten Strömung (Propellergeschwindigkeit) und der Auflast untersucht werden. Zur Bewertung der Abriebbeanspruchung von Geotextilien nach der RPG sollen vor und nach der Abriebbeanspruchung Turbulenzprüfungen durchgeführt und Untersuchungen mit einem Prüfverfahren mit einer laminaren Strömung, charakteristische Öffnungsweite nach DIN EN ISO 12956, gegenübergestellt werden. Es soll eine Versuchszelle für Ringversuche konzipiert werden.

2011: Es soll eine Versuchszelle für Turbulenzversuche an Proben im gedehnten Zustand konzipiert werden.

Das Vorhaben soll in 2012 abgeschlossen werden.

#### 5 Literatur

- [1] M. Maisner, B. Myles (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.
- [2] M. Maisner, B. Myles (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.



## **Untersuchung zum Einsatz von Mikrohohlkugeln in Beton als Alternative zum Luftporenbeton**

**Netzplan-Nr.:** A39510370002

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. F. Spörel, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B 3)

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

### **1 Problemstellung und Ziel**

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

Bei der Herstellung von Luftporenbetonen im Bereich der WSV sind in der Vergangenheit häufiger Schwierigkeiten aufgetreten, den angestrebten Luftgehalt über einen angemessenen Zeitraum zielsicher einzustellen. Dies kann sich in stark schwankenden Luftgehalten im Transportbetonwerk und/oder auf der Baustelle äußern mit der Auswirkung, dass eine nicht unerhebliche Zahl von Lieferungen aufgrund unzureichender Luftgehalte zurückgewiesen muss. Die Einflüsse auf die Luftporenbildung und -stabilität bei klassischem Luftporenbeton mit Luftporenbildner sind vielfältig und können grob in ausgangsstoffbezogene und herstell- bzw. einbaubedingte Ursachen eingeteilt werden. Eine Rückführung der Probleme auf einzelne Aspekte ist oft mit Schwierigkeiten und großem Aufwand verbunden.

Von ausgangsstoffbezogener Seite können sich durch die steigende Vielfalt der Zemente, Betonzusatzstoffe und –mittel und deren Kombinationsmöglichkeit zahlreiche Wechselwirkungen ergeben, welche die Luftporenbildung beeinträchtigen können. Langzeiterfahrungen und Kenntnisse über die Wechselwirkungen sind häufig nicht gegeben.

Wünschenswert wäre daher ein System, das robust gegenüber schwankenden Herstellbedingungen und Wechselwirkungen mit anderen Ausgangsstoffen ist, gleichzeitig aber eine ausreichende Dauerhaftigkeit bei Baumaßnahmen im Bereich der WSV mit den dort zu erwartenden Randbedingungen aufweist. Der Einsatz von Mikrohohlkugeln (MHK) ist im Regelwerk der DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN EN 1045-2 nicht geregelt. Der Einsatz ist über eine Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung, die durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) erteilt wird, möglich und bietet unter Umständen diese günstigen Randbedingungen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Betonbauwerke oder Bauabschnitte von Betonbauwerken im Bereich der WSV werden hinsichtlich des Frostangriffes häufig in die Expositionsklassen XF3 oder XF4 nach DIN 1045-2 bzw. ZTV W eingeordnet, in denen die Verwendung von Luftporenbeton vorgeschrieben ist (XF4) oder dieser im Bereich der WSV vorzugsweise eingesetzt wird (XF3). Von den o. g. Problemen, die beim Einsatz von Luftporenbeton beobachtet werden, ist deshalb eine große Anzahl der Baumaßnahmen im WSV-Bereich betroffen. Der alternative Einsatz von MHK könnte bei entsprechender Eignung Abhilfe schaffen und möglicherweise die Qualität und Dauerhaftigkeit sowie den Bauablauf verbessern. Angesichts der aktuell zu erwartenden höheren Kosten für MHK-Beton im Vergleich zu konventionellem Luftporenbeton dürfte das Einsatzgebiet von MHK-Betonen bei entsprechender Eignung zumindest derzeit sicherlich eher bei Baumaßnahmen mit geringeren Betonvolumina (z. B. Vorsatzschalen gemäß ZTV-W LB 219, Abschnitte 3 und 4) zu sehen sein.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Im Rahmen dieses FuE-Vorhabens soll der Frage nachgegangen werden, ob und in welchen Anwendungsbereichen der WSV der Einsatz von MHK mit Allgemeiner Bauaufsichtlicher Zulassung eine Alternative zum herkömmlichen Luftporenbeton sein kann. Der Einsatz von MHK ist derzeit nicht im Bereich der DIN 1045 bzw. DIN EN 206-1 geregelt. Es soll durch die Auswertung von Erfahrungen mit der Verwendung von MHK-Betonen sowie durch Laboruntersuchungen geklärt werden, ob durch den Einsatz von MHK hinsichtlich Dauerhaftigkeit und Bauablauf eine Gleichwertigkeit oder Verbesserungen im Vergleich zu konventionellem Luftporenbeton erzielt werden können. Für die Umsetzung in die Praxis soll ein geeignetes Konzept erstellt werden.

## 2 Untersuchungsmethoden

Bei der Anwendung der MHK stellen sich verschiedene Fragen, die bei diesem Baustoff von Interesse sind. Dabei zu beachtende Aspekte sollen im Rahmen der Untersuchungen bewertet werden.

Im Bereich der WSV und auch außerhalb wurden in Vergangenheit verschiedene Baumaßnahmen unter Verwendung von Mikrohohlkugeln älterer Generationen (PVC-haltig), damals noch ohne Allgemeine Bauaufsichtlichen Zulassungen des DIBt, ausgeführt. Es handelt sich um Anwendung im Spritzbeton sowie Transportbeton. Die dabei gesammelten Erfahrungen hinsichtlich der Verarbeitung, gewählter Qualitätssicherungskonzepte und Dauerhaftigkeit solcher Betone sollen in einem ersten Schritt zusammengestellt werden.

Darauf basierend sollen mögliche Anwendungsgebiete unter Verwendung von Beton bzw. Spritzbeton abgegrenzt werden. Die Beanspruchungen und die daraus resultierenden Anforderungen an den MHK-Beton sind festzulegen.

Schwierigkeiten bei klassischen Luftporenbetonen haben sich meist durch die vielfältigen Einflussgrößen auf die Luftporenbildung und –stabilität ergeben. Durch die vorgefertigten MHK stellt sich die Frage der Luftporenbildung im herkömmlichen Sinne nicht. Die Eigenschaften der MHK sind dafür entscheidend und müssen im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle und Fremdüberwachung sichergestellt werden. Die für die Anwendung im Bereich der WSV maßgebenden, zu prüfenden Eigenschaften müssen dazu festgelegt werden.

Die Luftporenstabilität erfasst den Widerstand der MHK gegenüber den herstell-, transport- und einbaubedingten Einwirkungen. Bei klassischen Luftporenbildnern können Wechselwirkungen mit Bindemitteln oder anderen Betonzusatzmitteln auftreten, die einen Einfluss auf die Luftporenbildung und Stabilität haben können. Ob vergleichbare Beeinflussung auch bei MHK erwartet werden können, wird über Laborversuche untersucht, in denen die unter baupraktischen Randbedingungen möglichen Einwirkungen im Labor abgebildet werden. Bei Vorliegen ausreichender Erkenntnisse sind Bauteilversuche unter praxisnahen Randbedingungen vorgesehen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Definition von geeigneten Annahmekriterien. Beim klassischen Luftporenbeton sind in DIN 1045-2 und ZTV-W LB 215 und LB 219 Mindestluftgehalte des Frischbetons in Abhängigkeit vom Größtkorn angegeben, mit denen ein ausreichender Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand erzielt werden kann. Dieses Vorgehen kann nicht auf den MHK-Beton übertragen werden, da der Luftporentopf nicht zum Nachweis der MHK geeignet ist. Eine Prüfung des MHK-Gehaltes im Frischbeton kann volumetrisch über das Verfahren nach ASTM C173:2001 erfolgen. Grenzwerte zur Erzielung eines ausreichenden Widerstandes sind jedoch in keinem Regelwerk verankert, so dass hier alternative Wege beispielsweise in Anlehnung an das Vorgehen bei den bauaufsichtlichen Zulassungen des DIBt von MHK gefunden werden müssen.

Die Untersuchungen sollen abschließend die Frage beantworten, ob die derzeit in den Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassungen des DIBt festgelegten Prüfungen für den Einsatz im Bereich der WSV übernommen werden können. Es wird geprüft ob ggf. ein abweichendes Vorgehen analog zum derzeitigen Nachweis des Frostwiderstandes im WSV-Regelwerk (ZTV-W LB 215 und ZTV W LB 219) gewählt werden sollte, um gleichwertige oder günstigere Eigenschaften wie beim klassischen Luftporenbeton sicherzustellen.

## 3 Ergebnisse

Eine Sichtung von Literatur und Aktenmaterial der BAW hat ergeben, das zum Einsatz von Mikrohohlkugeln der älteren Generation innerhalb der WSV bereits Erfahrungen aus den achtziger Jahren vorliegen. Mit der neuen Generation mit Allgemeiner Bauaufsichtlicher Zulassung werden derzeit außerhalb der WSV erste Erfahrungen gesammelt.

Erste Erkenntnisse der Laborversuche zeigen in Bild 1, dass bei Untersuchung wasserbauspezifischer Betonzusammensetzung grundsätzlich bereits mit Dosierungen deutlich unterhalb der in der Zulassung begrenzten maximalen Dosierung im Laborversuch eine ausreichender Frostwiderstand

erzielt werden kann. Der Beton ohne MHK erfüllt die Anforderungen an einen frostbeständigen Beton nicht. Im Vergleich zum Luftporenbeton werden deutlich größere Festigkeiten erzielt, die in der Größenordnung eines Betons ohne Luftporen liegen. Dies kann unter Umständen ein Vorteil sein.

Weitere Untersuchungen deuten an, dass ein Aufschwimmen der MHK vermutlich unkritisch ist. Augenmerk muss jedoch auf die mechanische Beanspruchung der MHK z. B. durch den Mischvorgang, Transport oder Pumpvorgang, gelegt werden, da dies bei ungünstigen Randbedingungen zu einer teilweisen Zerstörung der MHK mit nachteiligen Auswirkungen auf den Frostwiderstand führen kann. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass derartige Auswirkungen über die Frischbetonprüfung nach ASTM C173:2001 erfasst werden können.

Ein Bauteilversuch zur Erfassung von baupraktischen Aspekten wurde durchgeführt und die Versuchsergebnisse werden derzeit ausgewertet.

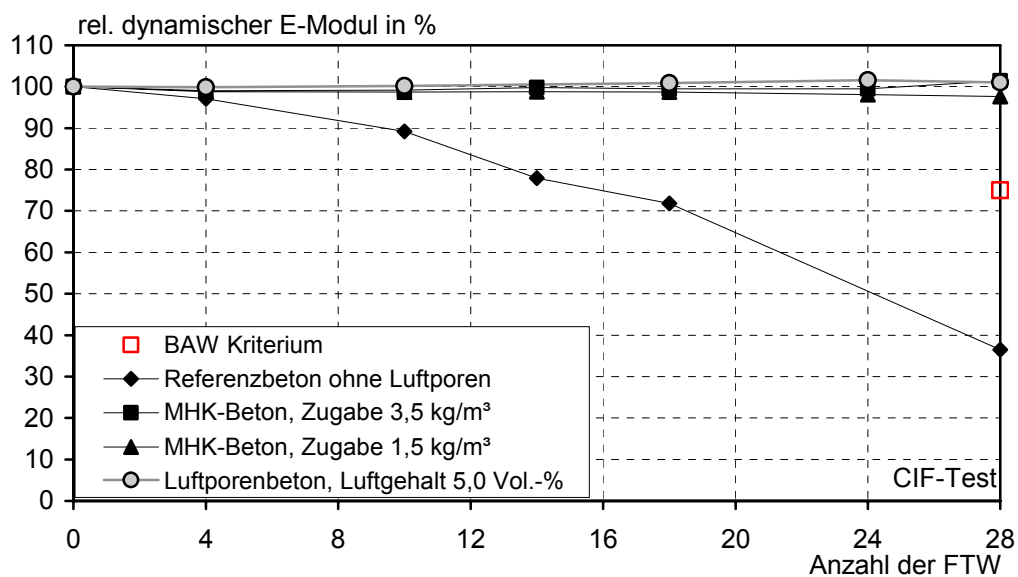


Bild 1: Entwicklung des dynamischen E-Moduls im CIF-Test nach BAW-Merkblatt „Frostprüfung“

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2010: Auswertung der Untersuchungen, Zusammenfassende Bewertung, Verfassung des Abschlussberichtes

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

**Netzplan-Nr.:** A39510370003

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. F. Spörel, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B 3)

**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. Hinsichtlich Art und Qualität der Betonausgangsstoffe 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 aber nicht allein durch die Dauerhaftigkeit des Betons an sich, sondern 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. Beim Bau solcher Bauteile 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 diesbezüglich für massive Bauteile (kleinste Abmessung > 0,80 m) entsprechende Anforderungen. Maßgebliche Parameter für die adiabatische Temperaturentwicklung eines Betons im jungen Alter 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 jedoch häufig gegenläufig. Das Fenster, welches dem Betontechnologen derzeit 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 des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) eingesetzt werden, oder wenn eine Zustimmung im Einzelfall durch die Bauaufsicht erteilt wird. Für sog. "Massenbetone" sind bereits mehrere Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen durch das DIBt erteilt worden. Die Zulässigkeit der Normabweichung wird vor Erteilung der Zulassung 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 BMVBS wären normabweichende Betone ebenfalls über eine Zustimmung im Einzelfall möglich. Über die Verwendung normabweichender Betone mit DIBt-Zulassung 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. Die geringeren Stahlmengen reduzieren die Kosten und beschleunigen den Bauablauf. Nachteilig aus Sicht der WSV ist der Umstand, dass die Verwendung von Betonen mit einer Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung und geringer Hydratationswärmeentwicklung nach derzeitiger Konstellation 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 soll 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 sollen durch geeignete Ansätze (theoretische Überlegungen, Nachweis der Gleichwertigkeit durch Performance-Ansätze) aufgezeigt werden.

Für die Umsetzung in die Praxis soll ein geeignetes Konzept erstellt werden.

## **2 Untersuchungsmethoden**

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.

Bei Betonen für Sohlen und bei vergleichbaren Bauteilen könnten unter technischen Aspekten die DIBt-Ansätze weitestgehend übernommen werden. Bei Betonen für Schleusenammerwände und vergleichbare Bauteile (Expositionsklasse XF3, Schiffsanfahrt) sind Art und Umfang des Nachweises der Zulässigkeit der Normabweichung noch festzulegen.

Zum Erreichen der Untersuchungsziele soll folgende Vorgehensweise verfolgt werden:

- Analyse ausgeführter Massenbetone innerhalb und außerhalb der WSV mit von der aktuellen Betonnormung abweichender Betonzusammensetzung unter Berücksichtigung ggf. gewählter normabweichender Qualitätssicherungskonzepte und ggf. vorliegender Erfahrungen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der mit solchen Betonen erstellten Bauteile.
- Beschreibung/Definition der Beanspruchung von Schleusenammersohlen und vergleichbaren Bauteilen bzw. Schleusenammerwänden und vergleichbaren Bauteilen im Süßwasserbereich inklusive überschlägiger Bewertung hinsichtlich der erzielbaren Hydratationswärmereduzierung. Für die jeweiligen Bauteile ist zu prüfen, ob und in welcher Form neben den gängigen Beanspruchungen beispielsweise für ein in die Sohle integriertes Füllsystem oder die mechanische Beanspruchung auf Schleusenammerwände infolge Schiffsanfahrt zusätzliche Anforderungen zu definieren und zu berücksichtigen sind.

- Erstellung eines Anforderungsspektrums für die genannten Bauteilbereiche. Nach derzeitigem Wissensstand sollte beispielsweise für Sohlbetone ein Mindestzementgehalt von 180 kg/m<sup>3</sup>, für Kammerwandbetone ein Mindestzementgehalt von 220 bis 240 kg/m<sup>3</sup>, vorzugsweise unter Verwendung von Luftporenbetonen avisiert und untersucht werden. Weiterhin werden mögliche Einschränkungen oder von DIN 1045-2 abweichende Regelungen (z. B. Anrechnung von Flugasche) bei den Ausgangsstoffen abgewogen. Die Mindestanforderungen an die Wasser-Bindemittel-Werte gemäß DIN 1045-2 sollten möglichst eingehalten werden. Die Festlegungen sollten so vorgenommen werden, dass eine spätere Aufnahme in wasserbauspezifische Regelwerke (ZTV-W LB 215) möglich ist.
- Erarbeitung und Umsetzung eines Untersuchungsprogramms ("Prüfplan") zur Absicherung der Zulässigkeit der Anforderungsspektren. Die Sicherstellung des Korrosionsschutzes der Bewehrung über eine Nutzungsdauer von 100 Jahren bzw. der Nachweis der Gleichwertigkeit mit DIN 1045-2- bzw. ZTV-W LB 215-konformen Betonen hinsichtlich des Frostwiderstands (XF3) nach dem BAW-Merkblatt "Frostprüfung" oder der Widerstand des Betons gegenüber mechanische Beanspruchung auf Schleusen-kammerwände sind wichtige Aspekte. Das Untersuchungsprogramm insgesamt wird durch ein Gremium von anerkannten Betontechnologen geprüft um die Vorgehensweise technisch abzusichern und die Akzeptanz in der Praxis zu fördern.

### 3 Ergebnisse

Die Analyse ausgeführter Massenbetonbauwerke besonders außerhalb der WSV hat bislang ergeben, dass besonders für Gründungsbauwerke Erfahrungen mit Betonen mit von DIN 1045-2 abweichenden Zementgehalten vorliegen. Über die bislang erteilten Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassungen ist die Anwendung von Mindestzementgehalten in den angestrebten Größenordnungen für Einsatzbereiche, die mit Schleusen-kammersohlen vergleichbare Expositionen aufweisen, bereits möglich.

Ein Gremium anerkannter Betontechnologen zur technischen Absicherung des Vorhabens konnte gewonnen werden.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

In 2009 haben die Arbeiten am FuE-Vorhaben aufgrund anderer Prioritäten weitestgehend geruht.

2010: Beschreibung der Beanspruchung wasserbaurelevanter Bauteilbereiche und Erstellung eines Anforderungsspektrums

2011-2012: Erarbeitung und Umsetzung eines Prüfplanes in Abstimmung mit dem Expertengremium, Erstellung eines Konzeptes zur Umsetzung der Erkenntnisse in die Praxis

2012: Abschluss des Vorhabens

**Messverfahren Hydratationswärme****Netzplan-Nr.:** A39510370004**Projektleiter:** Dipl.-Ing. F. Spörel, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B 3)**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. Aus diesem Grund kommt den Messverfahren zur Erfassung der Hydratationswärmeentwicklung eine besondere Bedeutung zu.

In DIN EN 196-8 verankert ist das Verfahren der Lösungskalorimetrie, bei dem an einem unhydratierten 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 mit diesem Verfahren 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 eines Zementes nur an Zementen mit der Eigenschaft LH bzw. VLH. An anderen Zementen erfolgt dies in der Regel nicht.

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 aufgrund der bei der Lösungskalorimetrie arbeitsschutztechnisch kritischen Randbedingungen (Arbeit mit Flusssäure und Salpetersäure) 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. In diesem Versuch wird ein Mörtel vorgegebener Zusammensetzung geprüft. Es können aber auch alternative Zusammensetzungen untersucht werden. Die Temperaturentwicklung wird kontinuierlich gegen eine bereits erhärtete Mörtelprobe aufgezeichnet. Über die Wärmekapazität der Ausgangsstoffe und des Kalorimeters sowie einer Berücksichtigung des Wärmeverlustes wird die unter diesen Bedingungen 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.

**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. 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.

### 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 (Thermosflaschenversuch) an einem Normmörtel und einer alternativen Mörtelzusammensetzung, die aus einer vergleichend im Kalorimeterversuch geprüften Betonzusammensetzung abgeleitet wird.
- Hydratationswärmebestimmung mit dem teiladiabatischen Verfahren (Thermosflaschenversuch) 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 im Bereich der WSV.

### 3 Ergebnisse

Bislang wurden zwei Betonrezepturen, die auch bei aktuellen Baumaßnahmen innerhalb der WSV zum Einsatz kommen, den Untersuchungsmethoden unterzogen. Erste Ergebnisse deuten an, dass prinzipiell mit teiladiabatischen Betonversuchen eine gute 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. Zur Absicherung dieser Erkenntnisse sind weitere Untersuchungsreihen geplant.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2010: Begleitend zu jeweils in der BAW durchgeführten Kontrollprüfungen werden die gleichen Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzungen den beschriebenen Prüfungen unterzogen. Nach Vorliegen einer ausreichenden Anzahl an Prüfergebnissen folgen eine zusammenfassende Bewertung der einzelnen Prüfmethoden und ein Ausblick auf das zukünftige Vorgehen bei Untersuchungen zur Hydratationswärmeentwicklung im Rahmen von Kontrollprüfungen bei Baumaßnahmen der WSV. Eine Zusammenarbeit mit verschiedenen Forschungseinrichtungen soll die zukünftige Vorgehensweise absichern.

Das Vorhaben soll 2012 abgeschlossen werden.



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

**Netzplan-Nr.:** A39510370005

**Projektleiter:** 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 einem ersten Schritt wurde mit Dienststellen der WSV der bisherige Einsatz von Acrylatgelen erörtert.

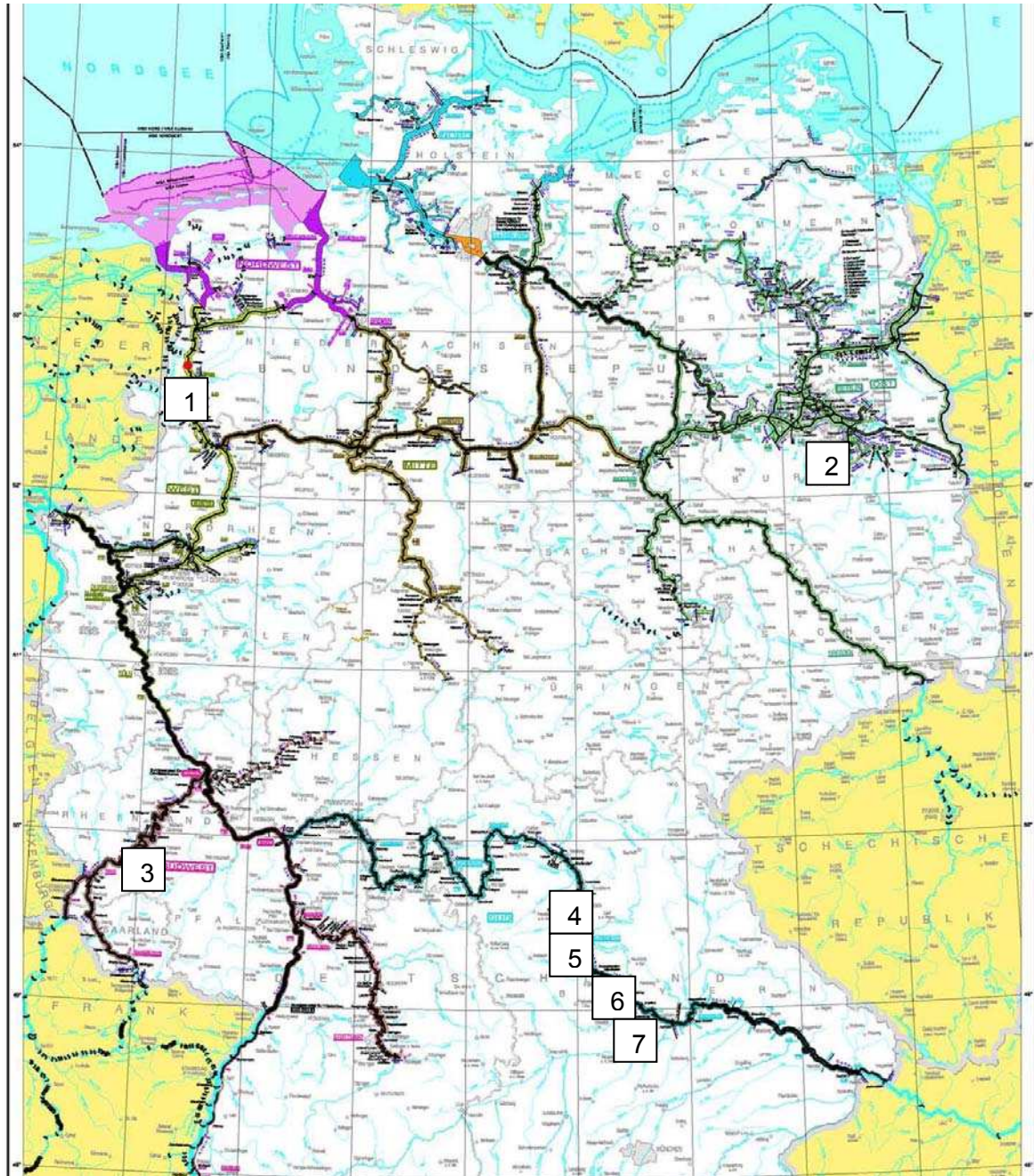
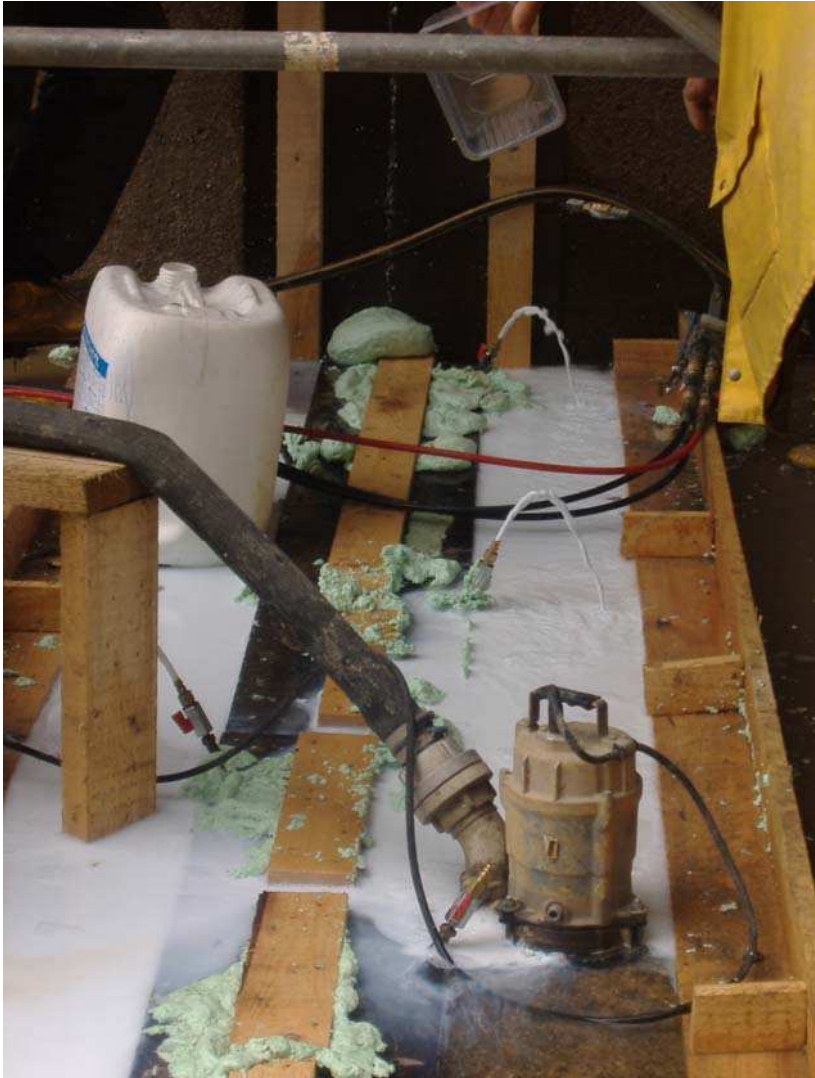


Bild 1: Übersichtskarte mit den bisherigen Acrylatgel-Anwendungen in der WSV

Aus der obigen Übersichtskarte, Bild 1, ist ersichtlich, dass bislang bei den Schleusen bzw. Staustufen Hüntel (1), Wermsdorf (2), Enkirch (3), Kriegenbrunn (4), Nürnberg (5), Eibach (6) und Leerstetten (7) Acrylatgele eingesetzt worden sind. Hierbei muss allerdings berücksichtigt werden, dass es sich hierbei um eine Stoffgruppe mit einer europäischen harmonisierten Anwendungsnorm ohne nationales Anwendungsdokument handelt. Für den Einsatz in der WSV ist daher die Zustimmung durch das BMVBS erforderlich. Wie aus Bild 2 ersichtlich, wurde bei einer Instandsetzungsmaßnahme der WSV festgestellt, dass bei anstehendem Wasserdruck das noch nicht ausreagierte Gel zur Entmischung

neigt. Laut der Sicherheitsdatenblätter der Hersteller dürfen verschiedene Ausgangsstoffe nicht in die Kanalisation gelangen. Durch die Entmischung kann daher eine Umweltgefährdung entstehen.



*Bild 2: Injektion und Entmischung der Ausgangsstoffe bei Wasserdruck*

An der UNI Essen wurde ein gerissener Balken mit Acrylatgel injiziert. Aus dem ausreagierten Reaktionsstoff wurden Platten für Platten für physikalische Prüfungen hergestellt. Die Zugeigenschaften, der Druckverformungsrest und der Weiterreißwiderstand sind deutlich schlechter als bei normkonformen Elastomer-Fugenbändern nach DIN 7865.

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

2010: Einholung von Erfahrungen mit vergleichbaren Maßnahmen außerhalb der WSV. Probeinjektion an einem Bauteilmodell zur Untersuchung der Dichtfunktion des Acrylatgels bei Fugenbewegungen. Bewertung des Gefährdungspotentials der Ausgangsstoffe und der ausreagierten Stoffe in Zusammenarbeit mit der BfG. Durchführung von Materialuntersuchungen an handelsüblichen Gelen in Zusammenarbeit mit einem Forschungsvorhaben der BAST.

2011: Bewertung der grundsätzlichen Eignung von Acrylatgelen für die genannten Anwendungsbereiche und gegebenenfalls Erarbeitung von Anwendungskriterien (Leistungsmerkmale und Qualitätssicherung Baustoffe; Anforderungen an Bauverfahren; Qualitätssicherung Bauausführung etc.).

2012: Abschluss des Vorhabens



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

**Netzplan-Nr.:** A39510370006

**Projektleiter:** 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 schleusenkammerseitigen 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 verschiedenen 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.

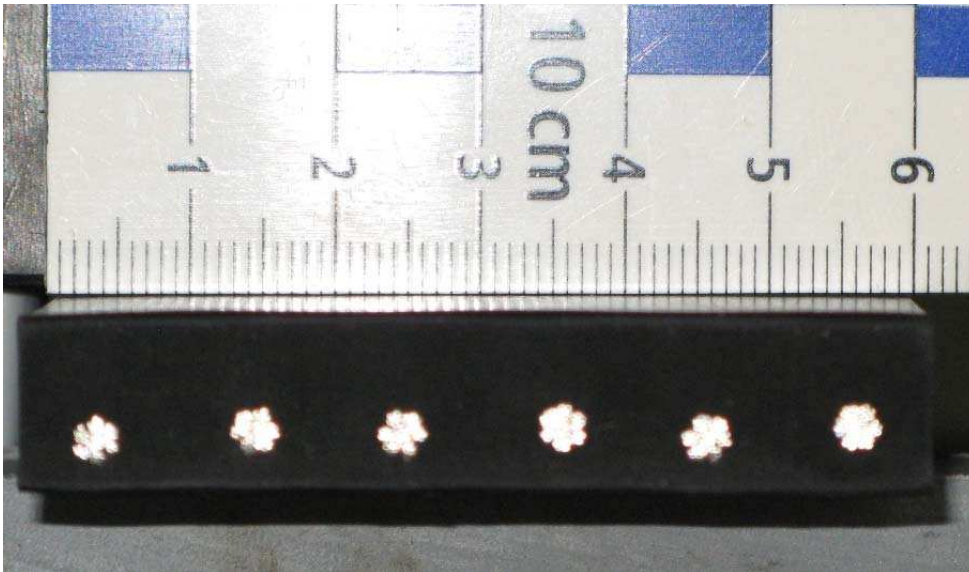
### **2 Untersuchungsmethoden**

- 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)

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 Nürnberg wurden anhand von Bohrkernuntersuchungen aus verschiedenen Schleusen am MDK festgestellt, dass die seinerzeit eingebauten Dichtungsbänder nicht nach dem heutigen Stand der Technik für Elastomer-Fugenbänder nach DIN 7865 entsprechen. In Zusammenarbeit mit einem Materialhersteller wurde die Herstellung einer aufgesetzten Elastomer-Dichtung mit einer Stahlseilbewehrung erörtert. Bei dem aus Bild 1 ersichtlichen Dichtungstyp bietet die Stahlseilbewehrung bei der Richtungsänderung in der Abdichtungsebene möglicherweise den besseren Anpressdruck auf die Betonfläche als bisherige Dichtungsbänder mit Gewebeeinlagen. Das direkte Verschrauben der Losflansche durch Langlöcher in der Stahlseilbewehrung kann die Retardation des Elastomers verhindern.



*Bild 1: Stahlseilbewehrtes Klemmfugenband im Querschnitt*

Im Rahmen einer Diplomarbeit an der TU Karlsruhe wurde das aus Bild 2 ersichtliche Bauteilmodell mit spannungshaltender Klemmung des SBK konstruiert und gebaut.



*Bild 2: Versuchsmodell - stahlseilbewehrtes Klemmfugenband*

Das Bauteilmodell berücksichtigt für den trockengelegten Pumpkanal der Schleuse Eibach eine Worst-Case Betrachtung bei einer Richtungsänderung in der Abdichtungsebene mit rückseitigem Grundwasserdruck. Bei einer Fugenbewegung von 20 mm wurde nachgewiesen, dass bei rückseitigem Wasserdruck von 1,2 bar kein Wasseraustritt visuell feststellbar ist. Ferner wurden im Rahmen der Diplomarbeit die Anforderungen an Bewegungsfugen kategorisiert und bereits ausgeführte Ertüchtigungsmaßnahmen und deren Nachhaltigkeit recherchiert.

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

- 2010: Durchführung eines Pilotprojektes für eine Fugeninstandsetzung mit dem SBK an einer Fuge der Doppelschleuse Kleinostheim am Main in Zusammenarbeit mit einer Fachfirma.
- 2011: Durchführung eines Pilotprojektes mit einer Bohrfirma am MDK mit einer Variante, bei der hinter der bisherigen Abdichtungsebene der Fugenspalt überbohrt wird und die Bohrung bis zum Kabelgang bzw. Pumpkanal läuft. In die Bohrung wird ein Fertigteil mit einem einbetonierten Fugenband eingesetzt und an die bestehenden aufgesetzten Fugenbänder angeschlossen. Weitere Erarbeitung von Ertüchtigungslösungen für schadhafte Bewegungsfugen in Abhängigkeit bestimmter Randbedingungen (u. a. Fugenweitenänderung, Zugänglichkeit, dauernde oder temporäre Wasserbeaufschlagung, Umweltaspekte, Wasserdruck und Temperatur).

Das Vorhaben soll 2012 abgeschlossen werden.

**FuE Hydroabrasion**

**Netzplan-Nr.:** A39510370008

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. F. Spörel, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B 3)

**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 mangels Alternativen übernommen. Tabelle 1 enthält wasserbauspezifische Beispiele, bei denen eine unterschiedliche Intensität der Beanspruchung vorherrschen kann.

*Tabelle 1: Expositionsklassen zur mechanischen Verschleißbeanspruchung von Beton mit wasserbauspezifischen Beispielen.*

| Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung |                                     |  |
|--|-------------------------------------|--|
| Klasse                                       | Beschreibung                        | Wasserbauspezifische Beispiele   |
| XM1  | mäßige Verschleißbeanspruchung      | Flächen mit Beanspruchung durch Schiffsreibung (z. B. Schleusenkammerwände oberhalb UW-1,0 m), Flächen mit mäßiger Geschiebefracht und mäßiger Strömungsgeschwindigkeit, häufig befahrene horizontale Verkehrsflächen (z. B. bei Güterumschlag), Eisgang |
| XM2  | starke Verschleißbeanspruchung      | Wehrrücken und Tosbecken mit mäßiger Geschiebefracht und hoher Strömungsgeschwindigkeit  |
| XM3  | sehr starke Verschleißbeanspruchung | Tosbecken mit starker Geschiebefracht und hoher Strömungsgeschwindigkeit   |

Inwiefern die im Wesentlichen aus Verkehr herrührende Expositionsklassensystematik der DIN 1045-2 auch die Hydroabrasion angemessen beschreibt, ist offen. Eine Überprüfung und ggf. Anpassung der Regelungen wäre daher erforderlich. Ausreichende Erkenntnisse und Untersuchungsergebnisse zur Festlegung geeigneter Kriterien lagen zum Zeitpunkt der Überarbeitung der ZTV-W LB 215 bzw. LB 219 noch nicht vor.

Auch auf der Widerstandsseite, die durch den Beton beschrieben wird, sind noch viele Fragen offen. beispielsweise in wiefern 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. Zu maßgebenden Kennwerten, die den Widerstand beeinflussen, gehen die Literaturangaben auseinander. Neben der Druckfestigkeit wird der Biegezugfestigkeit, der Bruchenergie oder dem dynamischen E-Modul in Kombination mit der Druckfestigkeit die wesentliche Bedeutung beigemessen [3], [4], [6]. Der Betonwiderstand hängt auch von der Härte, Größe und Zusammensetzung der Gesteinskörnung, des Verbundes zwischen Korn und Zementsteinmatrix sowie von der Beschaffen-

heit der Matrix ab [3], [2]. Ebenfalls werden Untersuchungen zu positiven Effekten durch Zugabe von Stahlfasern, Polypropylenfasern oder Gummigranulat beschrieben [5].

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 [1]. Weiterentwicklungen dieser Prüfeinrichtung werden in [2], [6] beschrieben.

## 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:

- Beschreibung der Beanspruchung aus Hydroabrasion für unterschiedliche Szenarien, um eine Einteilung von Bauteilbereichen mit unterschiedlicher Intensität der Beanspruchung analog zur Expositionsklassensystematik der DIN 1045-2 vornehmen zu können
- Bewertung eines Performance-Prüfverfahrens hinsichtlich seiner Eignung zur Beurteilung wasserbaurelevanter Schädigungsmechanismen durch Hydroabrasion
- 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. Ein für diese Zwecke geeignetes Prüfgerät soll dazu nachgebaut werden, um die vorgesehenen Laboruntersuchungen durchführen und maßgebende Betonkennwerte ermitteln zu können. Begleitet werden die Untersuchungen durch anerkannte Experten auf dem Gebiet der Hydroabrasion.

## 3 Ergebnisse

Ergebnisse liegen derzeit noch nicht vor.

## 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2010: Bau und Inbetriebnahme einer Prüfeinrichtung zur Beschreibung des Widerstands gegenüber Hydroabrasion, Ermittlung der Beanspruchung infolge Hydroabrasion für unterschiedliche Bereiche wasserbaulicher Anlagen aus Beton, Durchführung erster Versuche mit der neuen Prüfeinrichtung und Anbindung an bestehende Untersuchungsreihen, Erarbeitung eines Versuchsprogramms für die systematische Untersuchung des Hydroabrasionsverschleißes

2011: Durchführung der systematischen Untersuchungen, Bewertung der Untersuchungen



## 5 Literatur

- [1] Bania, A.: Bestimmung des Abriebs und der Erosion von Betonen mittels eines Gesteinstoff-Wassergemisches. Dissertation Technische Hochschule Wismar, 1989
- [2] Haroske, G.: Beitrag zum Hydroabrasionsverschleiß von Betonoberflächen. Dissertation Universität Rostock, 1998
- [3] Jacobs, F.; Winkler, K.; Hunkeler, F.; Volkart, P.: Betonabrasion im Wasserbau – Grundlagen – Feldversuche – Empfehlungen. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nr. 168, 2001
- [4] Helbig, U.; Horlacher, H.-B.: Ein Approximationsverfahren zur rechnerischen Bestimmung des Hydroabrasionsverschleißes an überströmten Betonoberflächen. In: Bautechnik 84, Nr. 12, S. 854-861, 2007
- [5] Kryzanowski, A.; Mikos, M.; Sustersic, J.; Planinc, I.: Abrasion Resistance of Concrete in Hydraulic Structures. In: ACI Materials Journal 106, Nr. 4, S. 349-356, 2009
- [6] Vogel, M.; Müller, H. S.: Hydroabrasivverschleiß bei wasserbaulichen Anlagen. Karlsruhe, Hamburg, Ilmenau: Bundesanstalt für Wasserbau. In: Tagungsband BAW Kolloquium der Abteilung Bautechnik: Baustoffe und Bauausführung im Verkehrswasserbau, 2009

## **Anwendung des Flat-Dilatometers zur Ermittlung von Bodenparametern in-situ**

**Netzplan-Nr.:** A39520105581

**Projektleiter:** Dipl.-Geophys. E. Kunz, Abteilung Geotechnik, Referat Baugrunderkundung (G1)

**E-Mail:** eberhard.kunz@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

Mit Hilfe des Flat-Dilatometers kann die sehr vielfältig variierende Struktur der oberflächennahen geologischen Schichtungen erfasst und für bautechnische Zwecke bewertet werden. Für die einzelnen Schichten können Bodenparameter für numerische Berechnungen abgeleitet werden, die das Bodenverhalten in-situ und im Zusammenwirken mit Bauwerken unter variablen Beanspruchungen erfassen.

Die Schubmodule  $G$  von Böden variieren im großen Maße mit der eingeleiteten Verformung. Die als  $G_0$ -Werte bezeichneten Schubmodule repräsentieren die Steifigkeiten für kleinste Dehnungen und sind somit die Startwerte für die Dehnungs-Steifigkeits-Beziehung. Die Abminderung der Steifigkeit mit zunehmender Dehnung ist nicht linear und sollte versuchstechnisch in situ bestimmt werden. Hierzu sind geotechnische Versuche in verschiedenen Dehnungsbereichen notwendig. Ein Dehnungsbereich kann hierbei durch die konventionellen Flat-Dilatometermessungen abgedeckt werden. Erweitert man das Messsystem durch seismische Messungen, kann durch die Bestimmung der Laufzeitunterschiede eine schichtenweise  $G_0$ -Wert-Bestimmung durchgeführt werden. Mit der Erweiterung des Flat-Dilatometers durch Einbau eines Wegaufnehmers ist eine Dehnungsabhängige Steifigkeitsbestimmung möglich und schließt somit die Lücke zwischen Bohrlochaufweitungsversuchen und seismischen Messungen

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

Nach bisherigem Stand der Technik eignet sich das Sondierverfahren besonders zur Erkundung von Weichböden und von gering festen rolligen Böden. Der Vorteil dieses indirekten Erkundungsverfahrens liegt darin, dass aus den Messungen anhand gesicherter Korrelationen eine Vielzahl von Bodenparametern abgeleitet werden können, die sonst nur durch aufwendige Laborversuche bestimmt werden können. Damit ist die Verbesserung der Aussagekraft auch mit einem deutlichen wirtschaftlichen Vorteil verbunden. Ferner werden störende Einflüsse auf die Bodenproben. Das Dilatometer ist derzeit das einzige Drucksondiersystem bei dem in-situ Steifigkeitsparameter direkt über eine Spannungs-Dehnungsbeziehung bestimmt werden. Die Ermittlung der Bodensteifigkeit erfolgt über die Registrierung der Membrandrücke bei zwei festen Membranauslenkungen ( $\Delta s=1\text{mm}$ ). Der Aufbau eines genaueren Messsystems ist mittlerweile möglich, wird aber vom Vertreiber des Dilatometers nicht angeboten.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Mit Hilfe des Flat-Dilatometers lassen sich auf relativ einfachem Wege eine Reihe wesentlicher Bodenparameter sehr schnell und damit wirtschaftlich im ungestörten Zustand im Feldversuch ermitteln. In der Standardversion können hiermit sehr sensitiv Scherzonen detektiert werden. Diese sind in der Regel sonst nur durch Inklinometermessungen die über einen längeren Zeitraum registriert werden erkennbar. Das Flat-Dilatometer bietet somit einen entscheidenden Zeitvorteil gegenüber dem herkömmlichen Verfahren.

In den erweiterten Versionen des Flat-Dilatometers (Seismik, Deformationsmessung) können Parameter für Stoffgesetze für die numerischen Simulationen gewonnen werden. Hierbei ist das in Plaxis implementierte HS-small-Materialmodell zu nennen. Für die Nachrechnung bestehender Schleusenanlagen wie z.B. am MDK, werden diese Stoffgesetze zur Berechnung der Interaktion zw. Baugrund und Bauwerk verwendet.

### 1.3 Untersuchungsziel

Mit dem Forschungsvorhaben werden generell zwei Ziele verfolgt. Ein Ziel ist der Einsatz des Flat-Dilatometers zur Detektion von Scherzonen an gefährdeten Rutschhängen wie beispielsweise am Stichkanal Hildesheim. Ein weiteres Ziel ist die Nutzung der Sonde zur Parameterbestimmung für das HS-small-Materialmodell (Plaxis).

### 2 Untersuchungsmethoden

Bei diesem Messverfahren wird, ähnlich wie bei einer konventionellen Drucksonde, ein spatenförmiger Metallkörper (Dilatometer) mit Hilfe eines Druckgestänges in den Untergrund eingedrückt oder eingerammt. Auf einer Seite des Dilatometers befindet sich eine kreisförmige Metallmembran, die über eine im Druckgestänge mitgeführte Druckleitung von außerhalb mit Pressluft beaufschlagt wird. Bei zwei definierten Membrandehnungen werden die hierzu erforderlichen Drücke gemessen, die hierbei mit dem auf die Membran wirkenden Bodendruck im Gleichgewicht stehen. Aus diesen Drücken lassen sich nach Marchetti folgende Größen ableiten:

|           |  |
|-----------|--|
| $K_D$     | Horizontaler Spannungsindex  |
| $E_D$     | Dilatometer Modul  |
| $K_0$     | Erdruchdruckbeiwert  |
| $c_u$     | undrännierten Kohäsion   |
| $M_{DMT}$ | Constrained Modulus ( $M_{DMT} = R_M E_D$ ; wobei $R_M$ eine Funktion von $K_D$ ist.<br>$M_{DMT}$ lässt sich nach Marchetti in das Steifemodul $E_s$ überführen) |
| $I_D$     | Material Index   |

Die Fortschreibung des Projektes ist eng an Vergleichsuntersuchungen gekoppelt. Das bedeutet, dass das Dilatometer in der Regel nur dann eingesetzt wird, wenn die Möglichkeit der Korrelation mit anderen Verfahren besteht.

### 3 Ergebnisse

Das Gerät wurde von der BAW bisher zu Untersuchungen von Böschungsrutschungen im Bereich des Stichkanals Hildesheim eingesetzt. Hierbei wurden Tone bis in eine Untersuchungstiefe von 12-14 m untersucht. Die Ergebnisse hinsichtlich der undrännierten Kohäsion  $c_u$  liegen in der gleichen Größenordnung wie die Werte, die aus dem Spitzendruck einer Drucksondierung abgeleitet werden können. Der deutliche Rückgang des Dilatometer-Moduls  $E_D$  gibt einen Hinweis auf die Tiefenlage der Scherfuge.

In Zuge der Sanierung der Schleusen am MDK wurde untersucht, ob sich mit dem Flat-Dilatometer zyklische Vorbelastungen des Baugrundes in Folge von Schleusungsvorgängen messtechnisch nachweisen lassen. Hierfür wurden Versuche am Schleusenstandorten Hausen durchgeführt.

Die Versuche wurden im Auffüllungsbereich der Kammerwand durchgeführt. Das anstehende Verfüllmaterial besteht hauptsächlich aus schwach feinkiesigen, mittelsandigen Grobsanden (Bild 1). Das untersuchte Material stellt den Grenzbereich der Anwendungsmöglichkeit der Versuchstechnik dar.

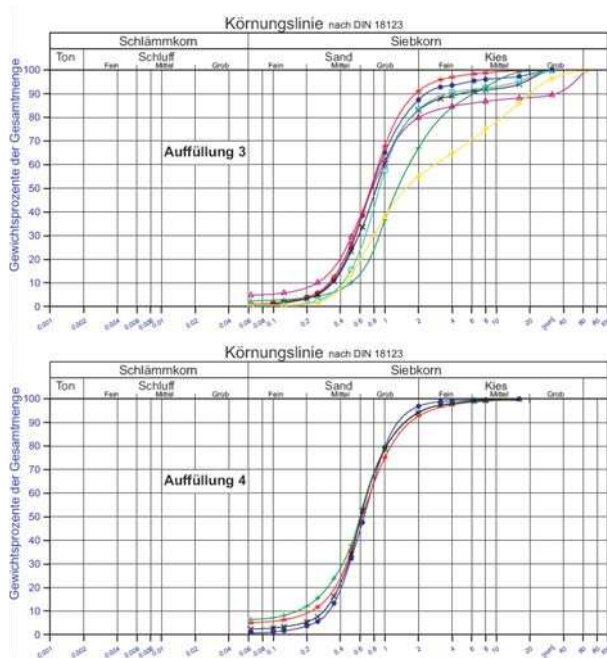


Bild 1: Kornverteilungslinien der Auffüllung 3 und 4

Die Gegenüberstellung der Sondierergebnisse (Bild 2) von CPT und Sondierungen mit dem Flat-Dilatometer zeigt eine große Ähnlichkeit zw.  $M_{DMT}$  und Spitzendruck  $q_c$ .

Mit der von Marchetti angegebenen Umrechnung des „Constraint Modulus“  $M_{DMT}$  in den Steifemodul  $E_s$  ist ein Vergleich mit den Ergebnissen der am Standort durchgeführten Bohrlochaufweitungsversuchen und den im Labor durchgeführten Drucksetzungsversuchen möglich.

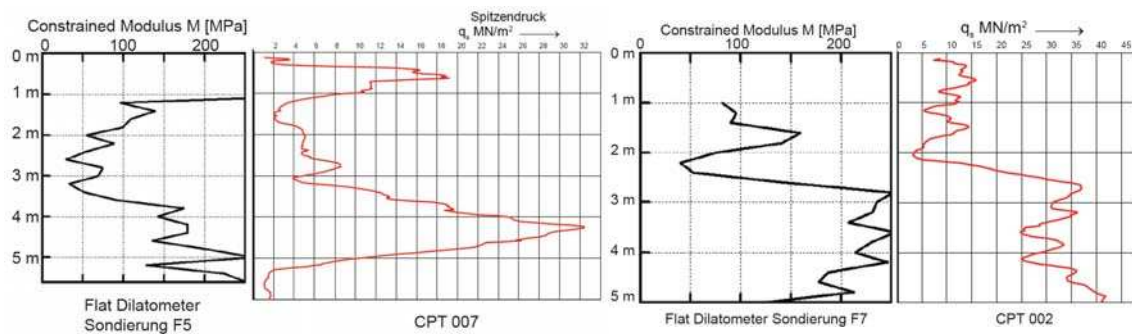


Bild 2: Gegenüberstellung von Flat-Dilatometermessungen mit Drucksondierungen (CPT)

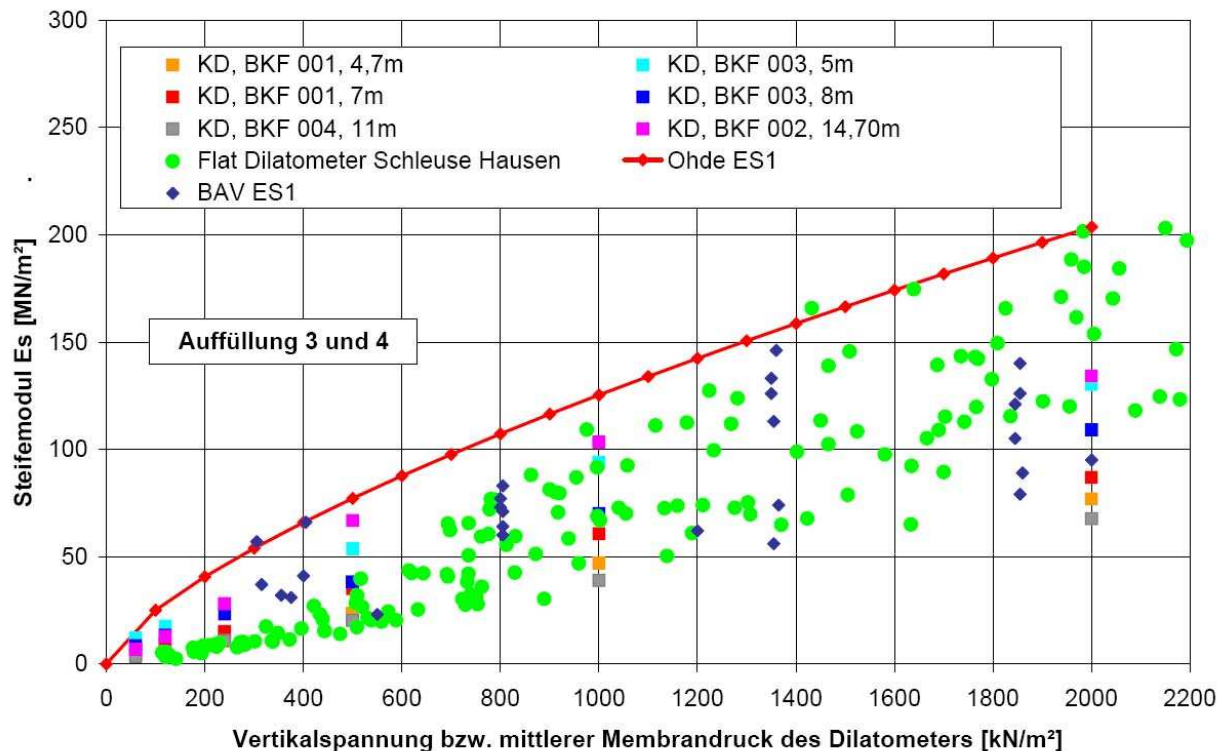


Bild 3: Vergleich der anhand verschiedener Methoden bestimmter Steifemodule am Standort Schleuse Hausen (Auffüllung 3 und 4)

Die grafische Auswertung der Ergebnisse (Bild 3) zeigt eine deutliche Korrelation der ermittelten Steifemoduli  $E_s$  des Erstbelastungsastes von in-situ Bohrlochaufweitungsversuchen, Drucksetzungsversuchen und den Werten der Flat Dilatometersondierung.

Zur weiteren Verifizierung dieses Zusammenhangs sollte das Dilatometer durch einen Verformungssensor ergänzt werden um Be- und Entlastungszyklen zu registrieren und hinsichtlich der Steifemodule auszuwerten.

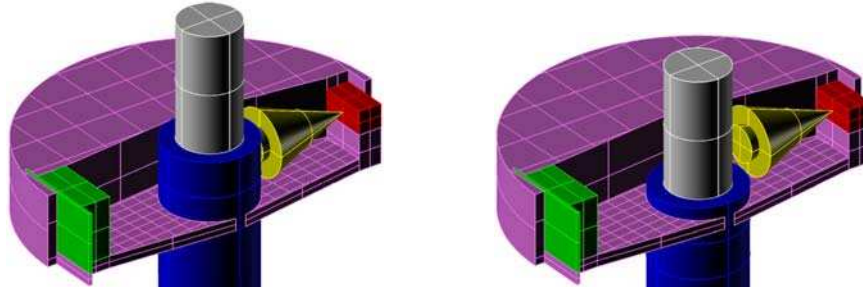
Die Randbedingungen für eine Verformungsmessung mit Dilatometer stellen an den zu verwendenden Sensor folgende Anforderungen:

Messweg: 1,1 mm  
 Auflösung: besser als 5/100mm  
 Baugröße: kleiner 5 mm  
 Robustheit: Innere und äußere Belastung des Dilatometers  
 Kosten: geringe Kosten, da der Sensor bei einem Defekt der Dilatometermembran zerstört wird.

Wegen der kompakten Bauart des Dilatometers können keine Standardsensoren verwendet werden. Zusammen mit dem Referat Z2 wurde versucht, eine kapazitive Sensorik zu entwickeln. Diese wurde wegen der Nichtlinearität und der Hysterese verworfen. Weitere Möglichkeiten für die Wegmessung der Membran des Dilatometers wären:

- Optische Sensoren (LED – Fotodiode)
- Faseroptische Dehnungsmessungen
- DMS-Technologie

Für den Bau eines optischen Sensors wurde eine Skizze entworfen (Bild 4). Der Sensor wurde bislang nicht realisiert. Die geforderten Eigenschaften konnten nicht überprüft werden.



*Bild 4: Skizze eines optischen Wegsensors mit LED (rot) als Lichtquelle und einer Fotodiode (grün) als Lichtsensor. Je nach Eindringtiefe des Stößels (grau) wird die Fotodiode beleuchtet. Die Signalstärke wird als Weg interpretiert. Baugröße: ca. 12mm breit und 3mm hoch.*

Die Weiterführung des Projektes ist nur sinnvoll, wenn für die Wegmessung der Dilatometermembran ein geeigneter Sensor entwickelt werden kann. Eine Eigenentwicklung der BAW (G1/Z2) in diesem Bereich als auch die Vergabe wird als unwirtschaftlich angesehen.

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

Das Forschungsprojekt soll im Jahr 2010 abgeschlossen werden.

**Konzept einer Datenbank für Ergebnisse boden- und felsmechanischer Laborversuche****Netzplan-Nr.:** A39520110069**Projektleiter:** Dipl.-Geophys. E. Kunz, Abteilung Geotechnik, Referat Baugrunderkundung (G1)**E-Mail:** eberhard.kunz@baw.de**1 Problemstellung und Ziel**

Im Jahr 2010 wird der Eurocode 7 „Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik“, Teil 1 „Allgemeine Regeln“ (EC 7-1) in Deutschland die Grundnorm für die Bemessung in der Geotechnik. Mit der Einführung des EC 7-1 hält auch der Begriff „vergleichbare Erfahrung“ offiziellen Einzug in die deutsche Praxis beim Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von geotechnischen Bauwerken. Im EC 7-1 wird er definiert als: „Dokumentierte oder anderweitig belegte Informationen zum Baugrund, die beim Entwurf, der Berechnung und der Bemessung bei gleichen Boden- oder Felsarten Verwendung finden, soweit vergleichbares geotechnisches Verhalten bei vergleichbaren Bauwerken zu erwarten ist. Als besonders relevant sind dabei örtlich gewonnene Erkenntnisse anzusehen“. Dieser Begriff findet sich in jedem Kapitel des EC 7-1, weil bei allen geotechnischen Nachweisen ein Rückgriff auf „vergleichbare Erfahrungen“ die Sicherheit einer Bemessung erhöht wird.

Eine besondere Rolle spielen die vergleichbaren Erfahrungen bei der Festlegung von charakteristischen Werten für die Bodenkennwerte von Berechnungen. Hier fordert der EC 7-1: „Die Wahl charakteristischer Werte für geotechnische Kenngrößen muss an Hand der Ergebnisse und abgeleiteten Werte aus Labor- und Feldversuchen erfolgen, ergänzt durch vergleichbare Erfahrungen.“

Während wir in Deutschland zur Geologie eines Standortes auf den Erfahrungsschatz der geologischen Karten zurückgreifen können, der auf Grund gesetzlicher Vorgaben über viele Jahrzehnte gesammelt wurde, fehlt eine solche Sammlung bei den Ergebnissen boden- und felsmechanischer Laborversuche.

**1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Zurzeit werden die Ergebnisse von bodenmechanischen und felsmechanischen Versuchen in den Labors bestenfalls in lokalen Datensammlungen bzw. kleineren Datenbanken heterogener Struktur „aufbewahrt“. In wenigen Fällen sind projektübergreifende Recherchen möglich. Die Pflege der Daten ist sehr aufwendig und meistens an eine Person in den jeweiligen Labors gebunden. Die IT-Wartungen der Aufbewahrungsstrukturen (Anpassungen an Betriebssysteme und neuere Programmversionen) wird in der Regel nicht durchgeführt. Dies führt dazu, dass ehemals lokal gut funktionierende Datenbanksysteme zu wertlosen „Datengräbern“ werden.

Die Abteilung Geotechnik betreibt mit Unterstützung vom „Zentralen Service Z3“ die Datenbank GeoLab. GeoLab ist einerseits eine weit entwickelte Auswertesoftware für die geotechnischen Labore in Hamburg und Karlsruhe, als auch eine Datenbank mit der nahezu alle zur Auswertung der Versuche benötigten Daten bis hin zu Originalmessdaten archiviert werden. Zum System GeoLab wurde das Online Recherchesystem GeoLab-Online entwickelt. Dies kann der Sachbearbeiter für projektübergreifende Kennwertrecherchen direkt über den Web-Browser nutzen. Das System GeoLab ist derzeit nur für „eigene neue“ Labordaten von Nutzen. Die Möglichkeit Fremddaten oder eigene Altdatenbestände zu importieren ist derzeit nicht möglich.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Die WSV betreut auf fachlich hohem Niveau sehr viele geotechnische Projekte. Für geotechnischen Leistungen wie Gutachten oder Baugrunderkundung werden in der Regel Ingenieurbüros beauftragt deren Leistungen auch im Bereich der Laborversuche zu prüfen bzw. zu plausibilisieren sind. Durch die Nutzung der angestrebten Kennwertdatenbank wäre dies einfacher möglich. Des Weiteren hat die WSV die Möglichkeit die Datenbank als Projektdatenbank zu Nutzen, ohne dafür Personal binden zu müssen. Durch eine Schnittstellendefinition können die geotechnischen Labore die Projekt- und

Kennwertdaten in die Datenbank einspeisen. Zusätzliche Kosten hierfür können schon bei der Vergabe der Leistungen berücksichtigt werden.

### 1.3 Untersuchungsziel

Auch wenn die Informationstechnologie heute Datenbanken erlaubt, die es ermöglichen, riesige Mengen von komplexen Daten zu bearbeiten, ist es entscheidend für die Nutzung im Sinne des EC 7-1 die Datenbank schlank aufzubauen und sich auf die Entwicklung einer Datenbank für „Kennwerte“ von Boden und Fels aus Laborversuchen zu beschränken. Unter Kennwert wird hier das Ergebnis eines Versuchs nach seiner Auswertung verstanden. Der Eurocode 7 bezeichnet ihn auch als abgeleiteten Wert einer geotechnischen Kenngröße. Kennwerte eines Triaxialversuchs sind zum Beispiel die Scherparameter  $\sigma'$  und  $c'$ . Die aus Versuchen abgeleiteten Werte geotechnischer Kenngrößen sind Grundlage bei der im nächsten Schritt erfolgenden Festlegung der charakteristischen Werte durch den entwerfenden Geotechniker, bei der nicht nur die Ergebnisse anderer Versuche und Erfahrungen sondern auch die geotechnische Fragestellung zu berücksichtigen ist. Der Begriff „Versuch“ wird hier sehr weit ausgelegt. Auch die Bodenansprache fällt darunter, denn ihr liegen einfache, genormte manuelle Versuche zugrunde.

Bei der Entwicklung der Datenbank stehen folgende Anforderungen im Vordergrund.

- In der Praxis ist es immer wieder hilfreich, wenn man auch ältere Daten oder schlechter dokumentierte Kennwerte berücksichtigen kann. Bei der Entwicklung des Konzepts einer Kennwertdatenbank wurde dies berücksichtigt, indem für die Kennwerte ein System von Zuverlässigkeitsklassen eingeführt wurde. Dadurch ist es möglich, einen größeren Datenbestand zu erhalten.
- Die Datenbank sollte offen sein sowohl für weitere Laborversuche als auch für Feldversuche. Der Schwerpunkt ist zwar zunächst auf Ergebnisse boden- und felsmechanischer Laborversuche gelegt worden. Eine spätere Erweiterung auf andere Verfahren ist möglich.
- Neben dieser auf die Festlegung charakteristischer Werte ausgerichteten Zielstellung sollte die Datenbank für eine Reihe weiterer Anwendungsgebiete nutzbar sein z. B.:
  - Recherche nach Bodeneigenschaften für ein Baufeldeinbindung der Daten in das GIS
  - Bewertung von Veränderungen der Eigenschaften, z. B. infolge veränderter klimatischer oder hydrologischer Verhältnisse
  - Wissenschaftliche Auswertung zur Bestimmung der Parameter leistungsfähiger Stoffgesetze.

## 2 Untersuchungsmethoden

Für die Umsetzung der Problemstellung wurde eine Initiativgruppe Boden- und Felsmechanische Datenbank gebildet, die ein Konzept für dieses Vorhaben entwickelt und versucht dafür im Kreis der Betroffenen Unterstützung zu mobilisieren.

Bisher sind an dieser Initiativgruppe folgende Institute beteiligt:

- Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- Lehrstuhl Baugrund-Grundbau der Universität Dortmund,
- Institut für Geowissenschaften – Ingenieurgeologie der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg,
- Landesgewerbeanstalt Bayern - Bautechnik GmbH - Grundbauinstitut
- Bayerisches Landesamt für Umwelt, Angewandte Geologie
- Fachgebiet Geotechnik der Hochschule für Technik und Wirtschaft, Dresden, ,
- Materialforschungs- und Prüfanstalt an der Bauhaus-Uni-Weimar,
- Normenausschuss "Baugrund; Laborversuche" des NABau



### 3 Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse der Initiativgruppe im Zeitraum 2008 sind im Folgenden:

Die Datenbank speichert die Kennwerte von vier Versuchsgruppen, die Klassifizierungsversuche, die Scherversuche, die Kompressionsversuche und die Durchlässigkeitsversuche, die in Zukunft jederzeit erweitert werden können. Jede dieser Versuchsgruppen enthält eine Reihe von Versuchsarten, z.B. bei Scherversuchen u. a. Triaxialversuche (auch mit unterschiedlichen Typen), Kreisringscherversuche und Rahmenscherversuche. Zu jedem dieser Versuchsarten gehört eine umfassende Beschreibung des Versuchs, z. B. die angewendete Norm, die Güteklasse der Probe, die Probenvorbereitung, die Randbedingungen der Geräte und Versuchsdurchführung sowie die Auswertekriterien. Diese Versuchsbeschreibung wird zu jedem Kennwert eingegeben und in der Datenbank hinterlegt. Darüber hinaus werden jedem Kennwert eines Versuchs natürlich auch noch die Kopfdaten wie Probenkennzeichnung, Entnahmeort und Entnahmetiefe sowie das Datum des Versuchs und das untersuchende Institut gespeichert. Kennzeichnend für die Datenbank ist daher, dass jeder Kennwert neben den Kopfdaten zur Identifizierung der Probe und des untersuchenden Instituts noch zusätzlich mit einer umfassenden Beschreibung des Versuchs und seiner Auswertung hinterlegt ist. Optional können noch Angaben zum Auftrag bzw. Projekt abgelegt werden. Diese Daten sind aber für alle anderen Nutzer der Datenbank nicht abrufbar. Diese Option dient nur der Recherche in eigenen Projekten.

Mit der vorgeschlagenen Struktur wird die Einbindung beliebiger Stoffgesetze ermöglicht, insbesondere von in Deutschland wenig gebräuchlichen Ansätzen. Damit wird ein Standard eingeführt, der nach Optimierung und Erprobung als Grundlage für die Programmentwicklungen, insbesondere Import- und Exportprozesse, genutzt werden kann. Wenn es gelingt, diesen Standard durch nationale und internationale Gremien weiter bekannt zu machen, besteht langfristig die Chance Erfahrungen leichter verfügbar zu machen.

Es ist nicht vorgesehen, innerhalb der Datenbank für Ergebnisse boden- und felsmechanischer Laborversuche alle Einzelschritte und Messwerte des Versuchs einzubeziehen. Hier beschränkt sich die Datensammlung auf die beschreibende Dokumentation der Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung. Diese Daten zur Versuchsdurchführung sind bei dem Bereitsteller der Daten vorhanden und der Nutzer der Datenbank kann diese Daten im Bedarfsfall beim Bereitsteller der Daten einsehen. Diese Beschreibung des Versuchs und seiner Auswertung ist ein ganz wesentlicher Bestandteil der Datenbank, weil er ein Verfahren zur Beurteilung der Güte eines Kennwerts ermöglicht. Es ist zwar nicht möglich, jeden Versuch bezüglich der richtigen Durchführung zu bewerten, doch kann die Zuverlässigkeit eines Kennwerts nachträglich daran überprüft und auch bewertet werden, in wie weit alle Messungen, Umrechnungen, Auswertungen und ggf. Korrekturen vollständig durchgeführt und protokolliert sind. Sind hingegen nur die Kennwerte bekannt und ist kein Rückgriff auf die ursprünglichen Messwerte möglich, so wird die Zuverlässigkeit des Kennwerts ist niedriger eingestuft. Auf Grund dieser Überlegungen wurde das Modell der Zuverlässigkeitsklassen eingeführt ähnlich dem der Güteklassen bei Bodenproben. Alle Kennwerte werden jeweils durch eine Zuverlässigkeitsklasse gekennzeichnet, die die Verfügbarkeit weiterer versuchsbedingter Informationen beschreibt. Es versteht sich, dass das Modell der Zuverlässigkeitsklassen ohne Veränderungen der Struktur auch bei der Einführung neuer Untersuchungsmethoden berücksichtigt werden können.

Die wesentlichen Ergebnisse der Arbeiten im Zeitraum 2009 sind im Folgenden:

#### Einbindung in das Projekt „Bohrpunktkarte Deutschland“ der BGR

Im Rahmen der 2. Besprechung zum Projekt "Interoperable Bohrdaten" der BGR wurde das BAW-Projekt „Konzept einer Datenbank für Ergebnisse boden- und felsmechanischer Laborversuche“ am 19.10.2009 in Berlin den „Staatlichen Geologischen Diensten“ vorgestellt. Aus der Verknüpfung der Bohrungs- und den Kennwertdaten ergeben sich sowohl für die geologischen als auch für die ingenieurtechnischen Disziplinen eindeutig Synergieeffekte. Viele geologische Dienste halten eigene Kennwertdatenbanken mit direkter Verknüpfung zu den Bohrinformationen vor und sind daran interessiert (standardisierte Schnittstellen vorausgesetzt) ihre Daten zu veröffentlichen. Um die Standardisierung weiter fortzuführen wird die BAW ihre Daten mit dem Symbolschlüssel Geologie (SEP3-Standard) abgleichen. Für Daten die nicht mit SEP3 abgebildet werden können (fast alle Kennwerte und Zusatzinformationen) muss ein hierarchischer Symbolschlüssel (Arbeitsname: **geotechnical value**, **GeoVal**)

in Anlehnung an den SEP3-Schlüssel definiert bzw. vereinbart werden. „GeoVal“ ist ein Wörterbuch mit Begriffen für die Beschreibung und Dokumentation geotechnischer Kennwerte. Für die interoperable Bohrdaten ist das Mappen der Bohrinformation (z. B. im SEP3-Wörterbuch) in das Format BoreholeML (XML-Modell) vorgesehen. Die Inhalte des GeoVal-Wörterbuchs werden auf gleicher Weise in ein XML-Modell übergeführt und stehen somit als standardisierte Schnittstelle zur Verfügung (Bild 1).

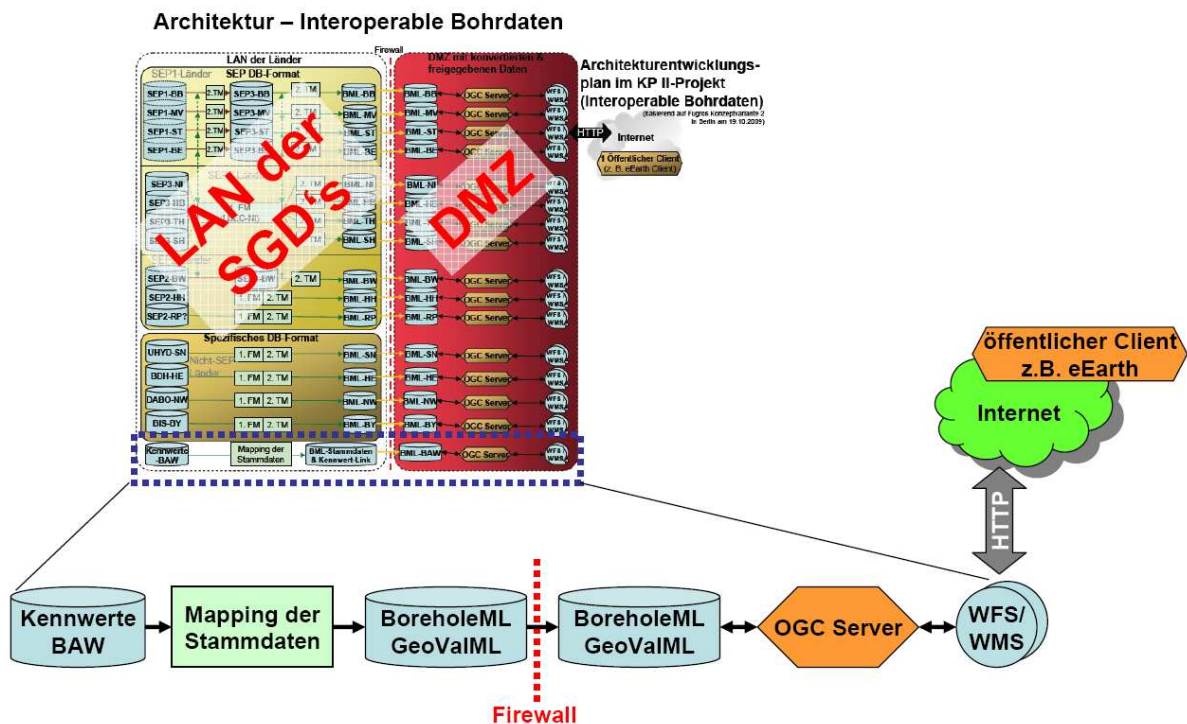


Bild 1: Einbindung in das Projekt „Interoperable Bohrdaten im bundesweiten Geodaten-Portal“

#### Softwareeinsatz

Für die Realisierung des Projektes soll überwiegend die Software GeODin (<http://www.geodin.com>) der Firma Fugro eingesetzt werden. Die für die Vergabe notwendigen Spezifizierungen und Anforderungen werden von der BGR formuliert. Zusätzliche Softwareanpassungen wie z. B. für den Zugriff auf die bestehende Datenbank GeoLab der BAW sowie für den Altdatenimport werden von der BAW vergeben. GeODin bildet somit für die SGD und die BAW die einheitliche Basissoftwarekomponente mit der auf den Bohrdaten bzw. Kennwertdaten gearbeitet wird.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Bis Ende 2010 sollen nachfolgende Arbeiten abgeschlossen sein.

- Erarbeitung eines ausführlichen Projektkonzeptes für das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung Referat WS 13
- Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (WiBe)
- Entwicklung des hierarchischer Symbolschlüssel **GeoVal** und des dazugehörigen XML-Modells

#### 5 Literatur

- [1] Schuppener, B.; Hettler, A.; Engel, J.; Kügler, M.; Kunz, E.: Konzept einer Datenbank für Ergebnisse boden- und felsmechanischer Laborversuche. Das Normhandbuch zum EC 7-1 und die DIN 1054:2008, Vorträge: Baugrundtagung 2008, Dortmund, 25. September 2008 (Veröffentlichung im Tagungsband)

## 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, wann es notwendig ist, solche Modelle einzusetzen und welche Parameter für die Verwendung dieser Modelle wichtig sind. Weiterhin sollen die Stoffgesetze durch den Vergleich der Prognosen mit Ergebnissen der Messungen 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, die für bereits vorhandene Stoffgesetze erforderlich sind, aus Labor- und Feldversuche abzuleiten, Stoffgesetze an wasserbautypische Bedingungen anzupassen und in FE-Programme einzubauen.

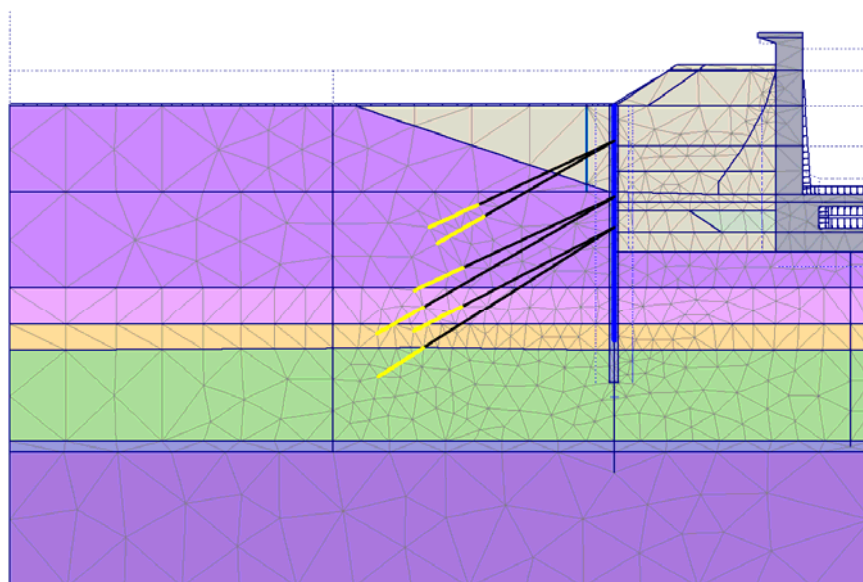


Bild 1: FEM-Modell im Bereich der Messquerschnitte NQ3 und NQ4

### 2 Untersuchungsmethoden

Bisher wurden verschiedene Stoffgesetze untersucht und für praktische Anwendungen das Hardening-Soil-Modell mit kleinen Dehnungen (*HS-small*) gewählt (Benz, Vermeer, Schwab, 2009). Zum Vergleich wurde das klassische Hardening-Soil-Modell ohne kleine Dehnungen (*HS-Modell*) angewendet. Zurzeit werden die Verhaltensprognosen der Südschleuse Sülfeld durch Vergleich mit den umfassenden Messergebnissen des Überwachungssystems kalibriert und Schlussfolgerungen zur

Parameterwahl bei künftigen Analysen gezogen. In dieser Phase werden die Messergebnisse für die Kalibrierung ausgewertet und neue FE-Berechnungen unter Anwendung der Programmsysteme Plaxis durchgeführt.

### 3 Ergebnisse

2009 wurden die meisten Messergebnisse vom Bau der Schleuse Sülfeld ausgewertet und die Vergleiche mit den vorherigen Prognosen durchgeführt. Nachfolgend werden die Ergebnisse für die Messquerschnitte NQ3 und NQ4 behandelt. Bild 1 zeigt das verwendete FE-Modell für die Berechnungen. Hierbei hat sich gezeigt, dass die an den Messergebnissen in der Ausführungsphase kalibrierten Bodenparameter bei der Nachberechnung sehr gute Ergebnisse liefern und nicht weiter modifiziert werden mussten. Die horizontalen Verformungen der Verbauwand (Dichtwand mit eingestellter Spundwand) im NQ 3 wurden mit Hilfe eines in der Wand eingebauten Inklinometerrohres gemessen. Bild 2 zeigt die gemessenen Verformungen für den Endaushubzustand der Baugrube. Die maximalen Verformungen von ca. 2,5 cm ergeben sich in Höhe der Ankerlage C. Leider wurde hier die „Nullmessung“ erst durchgeführt, als schon Verformungen infolge Aushub und Ankervorspannung eingetreten waren, was zu schwer interpretierbaren Messergebnissen infolge der unvollständigen Verformungsgeschichte der Wand führte. Für den Vergleich mit den Ergebnissen der FE-Berechnung sind daher verschiedene Varianten dargestellt, für die der Zeitpunkt der Inklinometernullmessung einmal vor und einmal nach der Vorspannung der Ankerlage A angenommen wurde. Diese unterscheiden sich nur oberhalb NN+51 m. Tatsächlich wurde die Nullmessung irgendwann während der Vorspannung der Ankerlage A durchgeführt, so dass der Mittelwert der beiden Varianten (im Bild als durchgezogene rote Linie) zu einer guten Übereinstimmung mit der Messung führt. Ergänzend ist die berechnete Gesamtverformung bezogen auf den Zustand vor Beginn der Baumaßnahme mit maximaler Verformung am Wandkopf von ca. 5 cm aufgetragen.

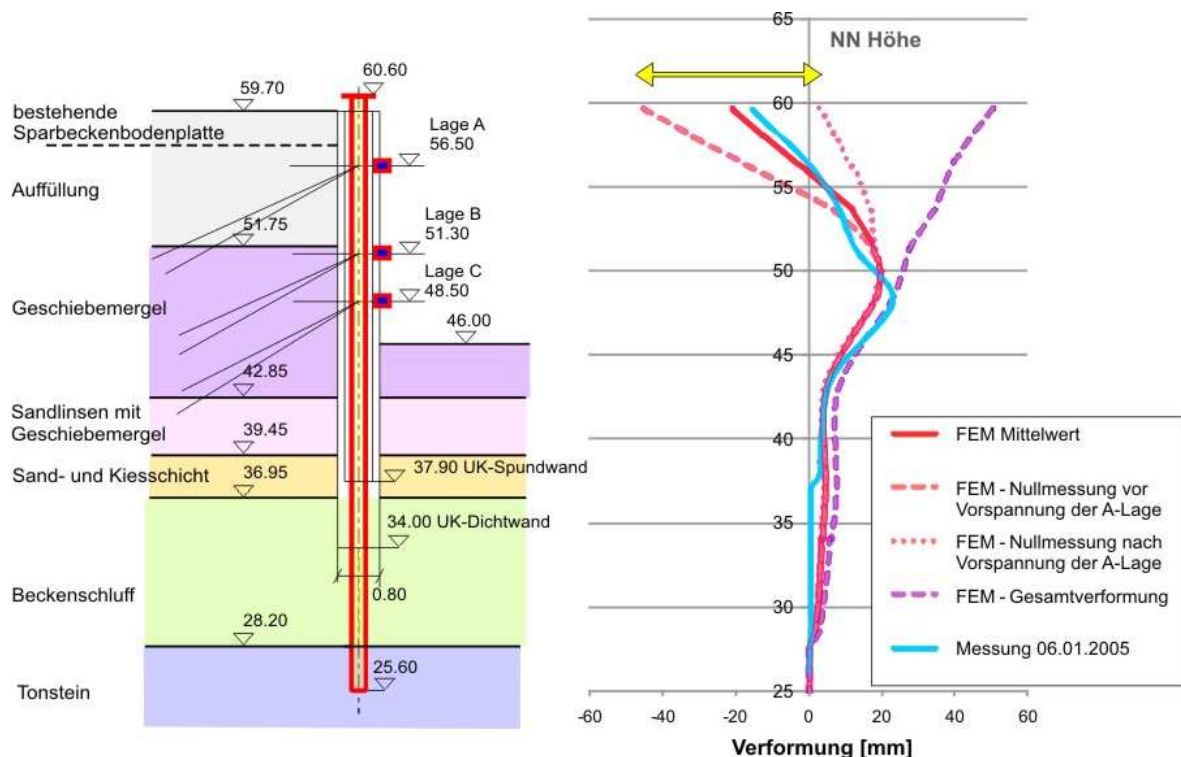


Bild 2: Bodenverhältnisse, Verankerung und Inklinometermessungen im NQ 3

Die vertikalen Verformungen der Baugrubensohle werden im NQ 4 mit 2 Mehrfachextensometern gemessen. Die Messergebnisse für die tiefsten Verankerungspunkte ca. 18 m unter Baugrubensohle sind in Bild 3 dargestellt. Da die Extensometer schon von der ursprünglichen Geländeoberkante aus eingebaut wurden, konnten sowohl die Hebungen der Sohle während des Aushubs der Baugrube

(maximal ca. 2 cm Mitte 2005) als auch die anschließenden Setzungen infolge des Baus der Schleusen-  
senkammer und der Hinterfüllung der Kammerwände (ebenso ca. 2 cm bis Anfang 2008) gemessen  
werden. Danach erfolgt eine Hebung um ca. 5 mm infolge der Abschaltung der GW-Haltung in der  
Baugrube und des damit einhergehenden geringeren Gewichts der Schleuse durch den Auftrieb. Im  
Herbst 2008 wurde eine erste Probeflutung der Schleusenkammer durchgeführt. Der Betrieb der  
Schleuse mit ständig schwankendem Wasserstand in der Kammer führte zu zyklischen vertikalen  
Verformungen und zusätzlichen Setzungen von bisher etwa 3-4 mm.

Der in rot dargestellte, berechnete Verformungsverlauf gibt das reale Verhalten gut wieder. Um dies  
zu Erreichen, war eine Konsolidationsanalyse unter Berücksichtigung des genauen Bauablaufs und  
der Dauer der einzelnen Bauphasen erforderlich.

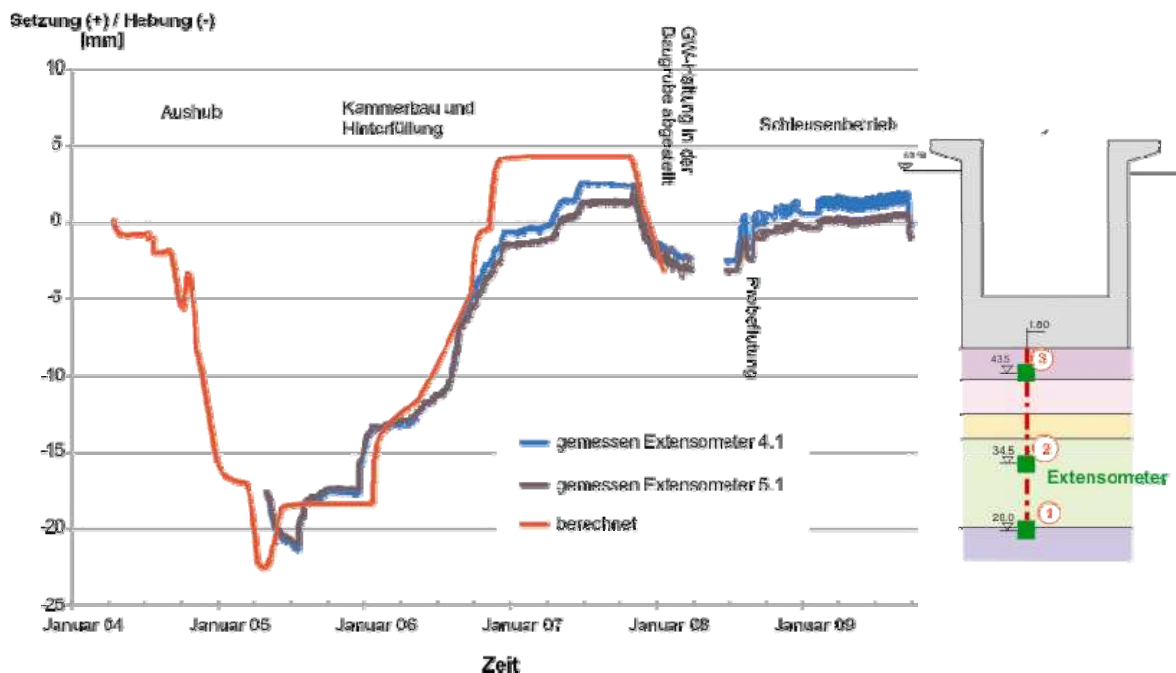


Bild 3: Vertikale Verschiebungen der Baugrubensohle im NQ4

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Für 2010 ist ein Abschlussbericht für Ergebnisse aus dem Bau der Schleuse Sülfeld geplant. Danach  
sollen die Messergebnisse vom Bau der Schleuse Bolzum ausgewertet und mit den Prognosen vergli-  
chen werden. 2011 soll das Forschungsvorhaben dann abgeschlossen werden.

#### 5 Literatur

- [1] Benz, T.; Vermeer, P. A.; Schwab, R. (2009): A small-strain overlay model. International Journal  
for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Band 33 pp. 25-44, John Wiley & Sons,  
London

## **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. Im Gegensatz zur klassischen Mechanik der ungesättigten Böden bildet dieses Modell die Verhältnisse unterhalb der Sickerlinie zutreffender ab. Die theoretischen Grundlagen wurde von Biot (ab 1941) bzw. Heinrich formuliert, zunächst nur sporadisch angewendet in der Hydrogeologie sowie in der Meeresforschung (Einwirkungen von Wellen auf den Meeresboden), ab etwa 2000 verstärkt auch auf andere Problemstellungen, insbesondere in der Geotechnik (Sato et al.): Erdbeben, Verflüssigung von Böden u. v. m.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Bedeutung dieser Untersuchungen für die WSV besteht darin, dass zahlreiche Problemböschungen an Binnenschiffahrtskanälen mit der o. g. Charakteristik (bindige Böden, unterhalb der Sickerlinie, besondere Beanspruchung durch Absenk) existieren. Die vorgesehenen Untersuchungen schaffen die Voraussetzung für ein verbessertes grundlegendes Verständnis der dahinterstehenden Mechanik. Auf dieser Grundlage werden wirksame Sanierungskonzepte entwickelt, was erst eine sinnvolle und deshalb wirtschaftliche Sanierung der gefährdeten Böschungen ermöglicht.

#### **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, ergänzt durch speziell angepasste Laborversuche. Damit soll untersucht werden, welchen Einfluss die Kompressibilität des Porenwassers auf das Bruch- und Verformungsverhalten dieser Böschungen besitzt (Anwendung des Dreiphasenmodells bestehend aus Feststoff, Wasser und Gas).

### 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 die Möglichkeit zum Porenwasserdruckabbau geschaffen wurde. Die Bohrungen, die zur Jahreswende 2001/2002 hergestellt wurden und bis in den Bereich der potenziellen Scherzone reichen, ermöglichen einen Abbau des anstehenden Porenwasserdrucks. Die zeitliche Veränderung der Porenwasserdruckverteilung sowie die Verschiebungen der Böschungen werden seither im Rahmen einer Eignungsprüfung gemessen. Die Druckentlastungsbohrungen haben sich inzwischen z. T. mit Wasser gefüllt; aus einigen Bohrungen tritt saisonal geringfügig Wasser aus. Somit entlastet die Bohrung im Endzustand mindestens entsprechend einem Potenzial, das durch die geodätische Ansatzhöhe der Bohrung maßgebend beeinflusst wird. Grundlegende Voraussagen zur Porenwasserdruckentwicklung, die auf der Anwendung des Dreiphasenmodells basieren, konnten somit messtechnisch verifiziert werden.

Bereits nach wenigen Wochen hat sich in der Umgebung der Bohrungen eine wesentliche Verminderung des mittleren Porenwasserdrucks eingestellt, wodurch sich die effektiven Spannungen im Bereich der Scherfuge erhöhten. Dadurch konnte die Standsicherheit der Böschung wesentlich verbessert werden. Die Rutschungsgeschwindigkeit hat sich um rund 85 % vermindert (siehe Bild 1, Stand: Ende 2009).

Auch nach einer zukünftigen Kanalvertiefung wird die Standsicherheit größer sein als im ursprünglichen Zustand. Eine aufwändige (und im konkreten Fall wohl kaum durchsetzbare) Abflachung der Böschung konnte dadurch vermieden werden.

Im Jahr 2009 wurde die Porenwasserdruckentwicklung weiter beobachtet. Das Messprogramm wird fortgesetzt bis ein quasi stationärer Endzustand erreicht ist. Die bisher gewonnenen Erkenntnisse wurden im Rahmen der Ausbauplanung SKH in konkrete Empfehlungen zur Sanierung von gefährdeten Böschungen bei SKH-km 3 umgesetzt.

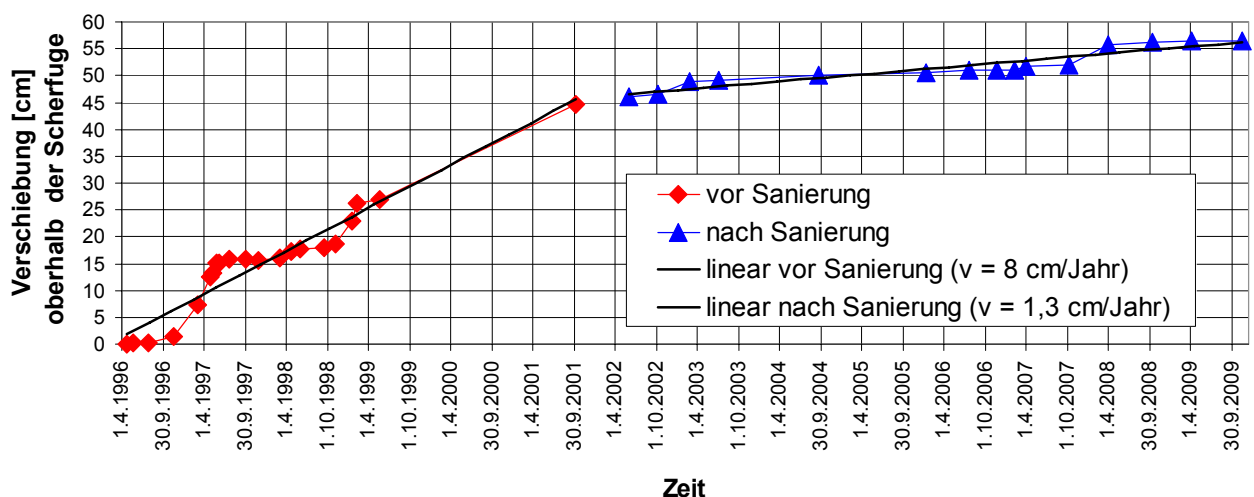


Bild 1: Verschiebungen des Böschungsfußes bei SKH-km 3,55 (Ostufer) aus Inklinometermessungen vor und nach der Sanierung (Stand: Ende 2009)

Von Fa. Ischebeck wurden auf Basis der Erkenntnisse der BAW technologische Entwicklungen vorangetrieben, die den Einbau von Druckentlastungsbohrungen wesentlich vereinfachen. Diese Entwicklung soll im Rahmen einer Eignungsprüfung an Ort und Stelle untersucht werden. Im Rahmen von

weiteren Erkundungen der Porenwasserdruckverteilung am SKH wurden als vorbereitende Teilmaßnahme auch für diese Eignungsprüfung 2009 entsprechende Porenwasserdrucksensoren am SKH installiert.

Um den Einfluss witterungsbedingter Randbedingungen zu minimieren, werden ergänzend im Tonbergwerk Klingenberg/Main in-situ in einem eigens für diesen Zweck aufgefahrenen Probestollen Porenwasserdruckmessungen durchgeführt. Mit einer untertägig angeordneten Messeinrichtung werden Messwerte aufgezeichnet. Mit diesen Messungen soll die Ausbreitung von Porenwasserdruckänderungen in einem relativ homogenen und sehr gering durchlässigen Bodenmaterial messtechnisch erfasst werden. Obwohl inzwischen absehbar ist, dass es aufgrund des Gebirgsdrucks nicht möglich sein wird, den Probestollen langfristig begehbar zu halten, werden die Messungen fortgesetzt.

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

2010: Nach Ausfall der automatischen Datenerfassung werden die Messungen im Bergwerk Klingenberg vorläufig manuell weitergeführt.

Von Fa. Ischebeck sollen 2010 (im bereits mit Messtechnik bestückten Messfeld) Druckentlastungsbohrungen hergestellt werden. Diese Messungen im Rahmen der Eignungsprüfung werden mindestens in den beiden Folgejahren (2011 und 2012) fortgeführt, um u. a. saisonale Einflüsse zu erfassen

#### **5 Literatur**

- [1] Köhler H.-J.; Schulze R. (2009): Stabilisierung von Einschnittböschungen mittels Wasserdruckentlastung im stationären und instationären Strömungszustand, 24. Christian-Veder-Kolloquium, Technische Universität Graz, Heft 35, 295-312, ISBN 978-3-900484-52-1



## **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 die größtmögliche 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.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

In Rahmen des Forschungsvorhabens wird das Eindringverhalten von typischen Binnenschiffen in Böschungskörper untersucht. Das Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung realistischer Prognoseverfahren für den Bremsweg und die Kontaktkräfte zwischen Schiff und Boden. Als Eingangsgrößen für die Prognoseverfahren sollen die bekannten Schiffsparameter Anfahrgeschwindigkeit 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. Details zu den Modell- und den Naturversuchen enthalten die Forschungskompodien der vergangenen Jahre.

### **3 Ergebnisse**

Zur Berechnung des Bremswegs wurden 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 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 kann auch durch die Videoaufnahmen eines unter statischen Bedingungen ausgeführten Versuches mit dem Spitzbugschiff 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 Berechnungsmodell wurde zunächst für das Pontonbugschiff aufgestellt und anhand der Versuchsergebnisse validiert (siehe Kurzbericht zum Forschungsvorhaben 2007).

Für die Berechnung der Länge des Bremswegs und der Kontaktkräfte müssen die Bodenparameter: Wichte, Reibungswinkel, Wandreibungswinkel zwischen Bug und Böschung sowie - im Falle nicht rolliger Böden - die Kohäsion bekannt sein. Weitere Eingabeparameter sind die Anfahrgeschwindigkeit des Schiffes, Masse und 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 Erdwiderstandes 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.

Die Erweiterung des Berechnungsmodells auf das Spitzbugschiff erforderte die Anpassung an die Geometrie des Buges (siehe auch Kurzbericht des Forschungsvorhabens 2008). Da sich die Buggeometrien der verwendeten Spitzbugschiffe vom Typ „Johann Welker“ und „Gerda“ voneinander unterscheiden, wird im Programm zusätzlich auch der Typ des Spitzbugschiffes berücksichtigt.

Da beim Spitzbugschiff im Gegensatz zum Pontonbugschiff keine konstante Breite des Buges angenommen werden kann, muss bei der Berechnung des passiven Erddrucks zudem die Breitenentwicklung des Buges in Abhängigkeit der Eindringung des Schiffes in die Böschung und der Lage der Kontaktfläche auf dem Bug berücksichtigt werden. Dazu werden vorhandene Spantenpläne der Spitzbugschiffe verwendet.

Im Bild 1 links sind der berechnete Bremsweg im Vergleich mit dem gemessenen Bremsweg für einen Modellversuch mit dem Spitzbugschiff Johann Welker dargestellt. Der verwendete Modellversuch simuliert den Schiffsstoß mit einer Masse von 2328 t und einer Anfahrgeschwindigkeit von  $v_a \approx 20$  km/h. Die Grafik im Bild 1 rechts zeigt den Vergleich zwischen Messung und Rechnung für die horizontale Kontaktkraft sowie die Größe der berechneten vertikalen Kontaktkraft. Der Vergleich in Bild 1 zeigt, dass das Rechenverfahren auch für das Spitzbugschiff eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung festgestellt werden kann. Der Kurvenverlauf des Bremswegs zu Beginn des

Bremsvorgang verläuft rechnerisch geringfügig steiler im Vergleich zum experimentellen Ergebnis. Die zugehörige rechnerische horizontale Kontaktkraft ist dabei kleiner im Vergleich zur gemessenen Kraft.

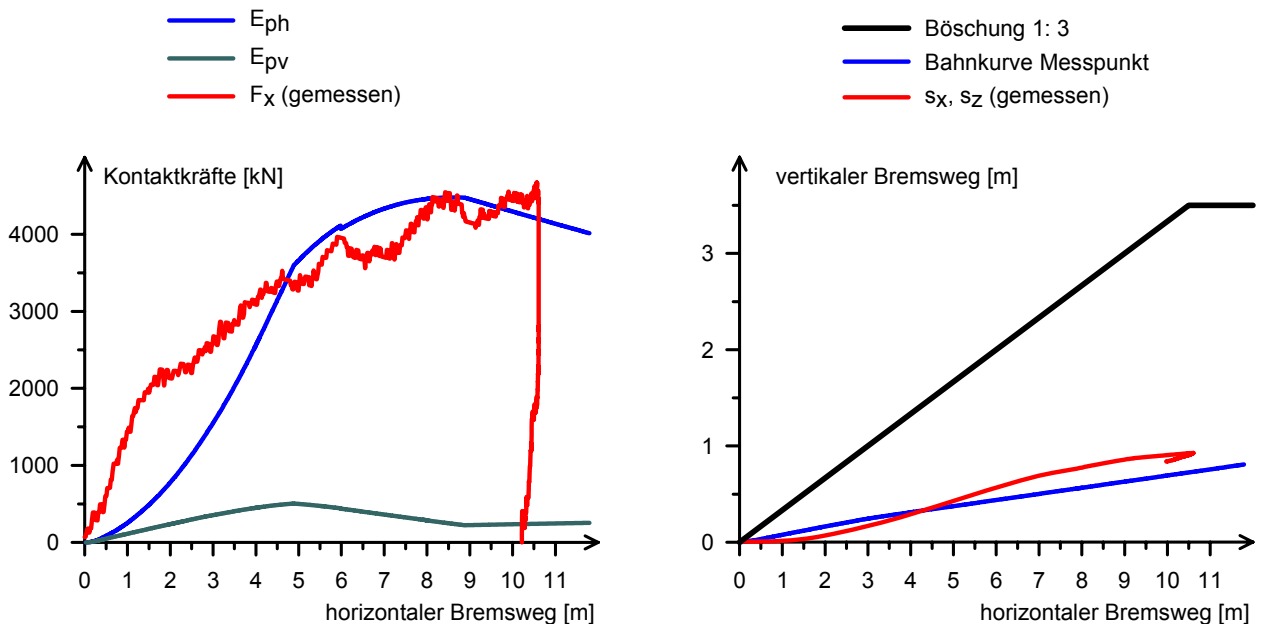


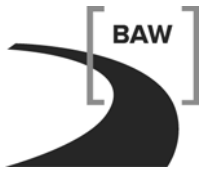
Bild 1: Berechnete und gemessene Kontaktkräfte (links) sowie berechneter und gemessener Bremsweg im Vergleich (rechts)

Mit dem Ziel der Optimierung des Berechnungsverfahrens für das Spitzbugschiff werden derzeit folgende Einflüsse auf die Größe und den Verlauf des Bremswegs und der Kontaktkräfte untersucht:

- Berechnung des Bodenwiderstandes durch Ansatz des Grundbruchs (anstatt des Erdwiderstandes)
- Berücksichtigung einer Reibungskraft an der Bugwand
- Berücksichtigung einer Sohlreibung,

Dazu wurde das Berechnungsverfahren erweitert, abschließende Untersuchungsergebnisse liegen jedoch noch nicht vor.

Das mit der Nachrechnung der Naturversuche beauftragte Ingenieurbüro Kramer & Albrecht aus Hamburg hat im Dezember 2008 den Abschlussbericht für die Bremswegberechnung des Spitzbugschiffes Gerda vorgelegt. Auch hier ergibt sich auf der Grundlage der Erdwiderstandstheorie eine zufriedenstellende Abschätzung der Länge des Bremswegs, wobei in diesem Fall der Verlauf des Bremswegs mittels Eingangsparameter vorgegeben wurde. Untersuchungen des Ingenieurbüros Kramer & Albrecht 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 Bremswegs genügt damit ein Ansatz der Auftriebswichte bei der Berechnung des Erdwiderstands. Eine Überprüfung dieses Ansatzes soll mit Hilfe des oben beschriebenen Berechnungsverfahrens erfolgen, bei dem der Verlauf des Bremswegs zu Beginn des Bremsvorgangs nicht bekannt ist.



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

2010: Im Jahr 2010 sind weitere Vergleichsberechnungen und eine Evaluierung der Unterschiede in den Berechnungsverfahren geplant. Das Forschungsvorhaben soll 2011 abgeschlossen werden.

#### **5 Literatur**

- [1] Kauther, R., Schuppener, B.: 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
- [2] Kauther, R.: Vortrag im Rahmen der Vortragsreihe "Verkehrswasserbau" der BAW am 3. Juli 2009

## Modellierung der Verformung nichtbindiger Böden unter zyklischer Belastungseinwirkung von Schleusenbauwerken

Netzplan-Nr.: A39520210045

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

Nichtbindige Böden zeigen infolge zyklischer Belastung eine erhebliche 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 erhebliche Langzeitsetzungen beobachtet werden (Bild 1). Sind diese Langzeitsetzungen nicht schon in der Planungsphase hinreichend genau bekannt, können sie zu erheblichen Bauwerksschäden führen.

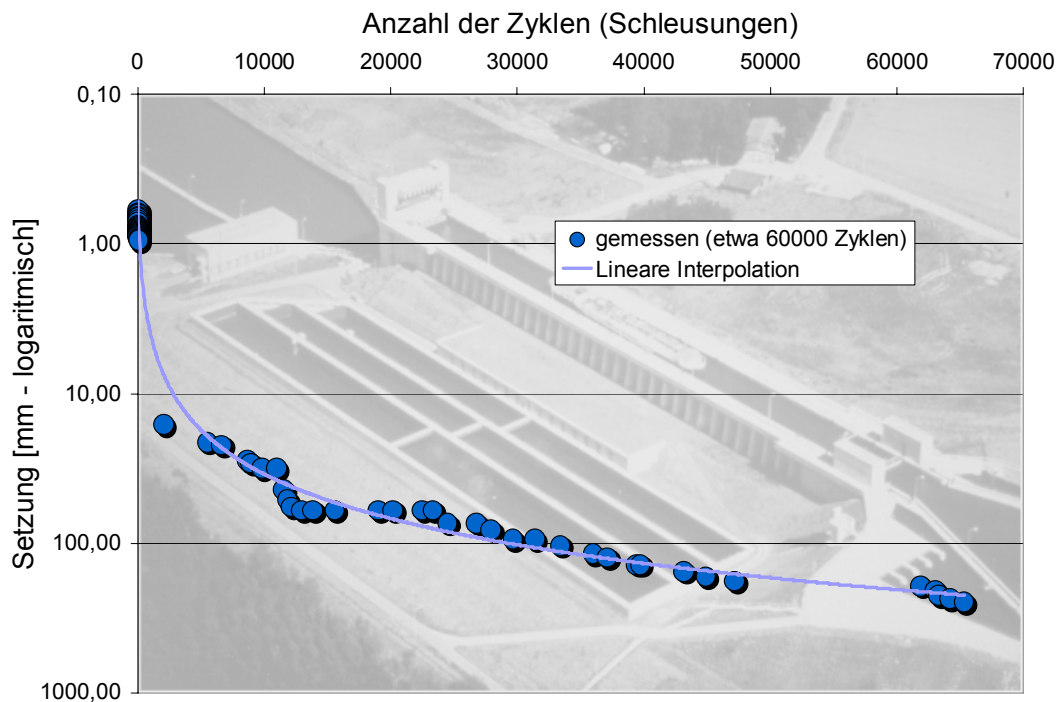


Bild 1: Setzungen der Schleuse Uelzen I als Funktion der Lastzyklen (= Schleusungen).

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

Zur Vermeidung von Bauwerksschäden, wie auch zu einer wirtschaftlichen 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

Entwicklung eines Stoffgesetzes und dessen numerischer Implementierung in ein Finite-Elemente Programm (ABAQUS / PLAXIS), das es erlaubt, Langzeitsetzungen von Schleusenbauwerken hinreichend genau zu berechnen. Das Rechenmodell soll 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 2002-2004 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 analytische Beziehungen zwischen diesen bestehen, werden die internen Modellparameter iterativ bestimmt. Die Anzahl der internen Modellparameter des Ausgangsmodells wurden zu Gunsten der Robustheit des Algorithmus zur Konvertierung der Materialparameter 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 ist 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).

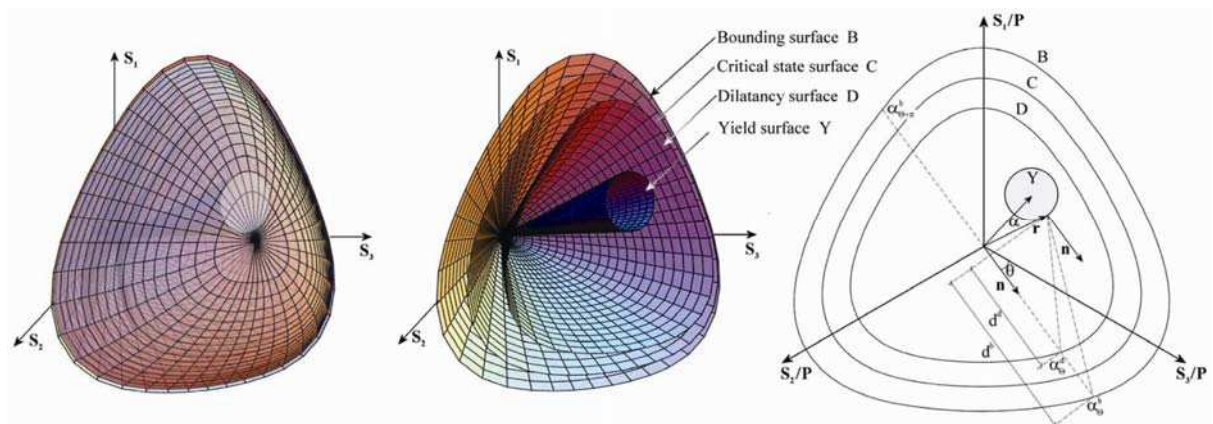


Bild 2: Das verwendete Bounding-Surface Modell im Hauptspannungsraum dargestellt: (a) Kappe – nur der hervorgehobene Bereich der Kappe ist aktiv; (b) Grenzflächen des Modells; (c) Projektionsregeln

Das vereinfachte Modell wurde für triaxiale Bedingungen getestet. Konvergenzprobleme wurden bei sehr kleinen mittleren Spannungen erkannt.

Zusammenfassung der im Projekt bislang erzielten Ergebnisse:

- Numerische Umsetzung eines Bounding Surface Modells; Erste erfolgreiche Nachberechnung von Laborversuchen (siehe Bild 3), Erste Nachberechnung 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 in internationalen und nationalen Fachzeitschriften veröffentlicht (siehe Literatur).

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

Der für 2009 vorgesehene Abschlussbericht konnte wegen personeller Veränderungen beim externen Forschungspartner nicht erstellt werden. Unter den neuen Randbedingungen ist voraussichtlich erst im Winter 2010/2011 mit der Fertigstellung zu rechnen.

Es ist bis dahin geplant die Konvergenzprobleme zu beheben. Weiterhin sind im Zuge einer kommerziellen Anwendung folgende weitere Modifikationen vorgesehen:

- Optionale Mohr-Coulomb-Grenzfläche (Anwendbarkeit für Standsicherheitsberechnungen)
- Implementierung aller 6 Spannungskomponenten.
- Porenzahlabhängige Verfestigung

Daran schließt eine Testphase an.

#### **5 Literatur**

- [1] Vermeer, PA.; Schwab, R; Benz, T. (2006): Two Elastoplastic Models for Small and Large Strains and Their Use in Engineering Practise. In: Modern Trends in Geomechanics, pp 175-190, Balkema, Rotterdam, 2006.
- [2] Benz, T. (2007a): Small-Strain Stiffness and its Numerical Consequences. Dissertation, Institut für Geotechnik. Universität Stuttgart, 2007.
- [3] Benz, T.; Vermeer, PA. (2007b): Zur Berücksichtigung nichtlinearer Bodensteifigkeit im Bereich kleiner Dehnungen in geotechnischen Berechnungen. Bautechnik 11, 2007, pp. 749 - 761.
- [4] Benz, T.; Vermeer, PA.; Schwab, R. (2009): A small-strain overlay model. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 33(1), 2009, pp. 25 – 44.

## Numerische Modellierung von Bruchvorgängen in Böden

Netzplan-Nr.: A39520210084

Projektleiter: Dipl.-Ing. O. Stelzer, Abteilung Geotechnik, Referat Grundbau (G2)

E-Mail: oliver.stelzer@baw.de

### 1 Problemstellung und Ziel

#### 1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Um realistischere Stabilitätsberechnungen durchführen zu können, ist ein numerisches Modell erforderlich, welches die Entstehung und Fortpflanzung von Versagensmechanismen beschreiben kann und darüber hinaus die wichtigsten Bodeneigenschaften erfasst. Dazu gehört das bei einigen Böden (steife Tone und dicht gelagerte Sande) und Fels festgestellte Entfestigungsverhalten. Nach Erreichen der maximalen Scherfestigkeit  $\tau_{max}$  fällt diese bei zunehmenden Verformungen bis zur Restscherfestigkeit  $\tau_r$  ab (Bild 1).

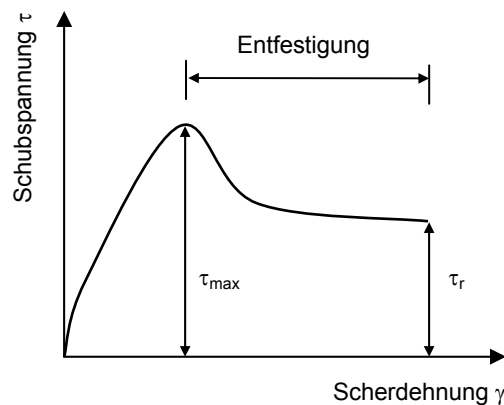


Bild 1: Schubspannungs-Scherdehnungs-Diagramm mit Entfestigungsverhalten

Der Vorteil der Verwendung der Methode der finiten Elemente zur Modellierung von Bruchvorgängen ist, dass keine Annahmen zur Form und Lage der maßgebenden Gleitfläche getroffen werden müssen, da diese aus der Berechnung hervorgehen. Die Ergebnisse sind jedoch von der gewählten Diskretisierung des betrachteten Problems abhängig, so dass das Entfestigungsverhalten und die in Böden auftretenden dünnen Scherbänder nur unzureichend beschrieben werden können.

Aufbauend auf Forschungen an der TU Delft zur Modellierung von Bruchvorgängen in spröden Materialien wie Beton und Fels soll nun ein für Böden geeignetes Modell entwickelt werden, welches die genannten Einschränkungen nicht mehr aufweist und außerdem die Interaktion zwischen Boden und Grundwasser berücksichtigt

#### 1.2 Bedeutung für die WSV

Der Grenzzustand der Tragfähigkeit für Bauwerke und Böschungen kann mit einer zutreffenden Beschreibung des Bodenverhaltens und damit einer realitätsnahen Ermittlung des Versagensmechanismus zuverlässiger berechnet werden, was zu einer sichereren und wirtschaftlicheren Bemessung von Bauwerken des Verkehrswasserbaus führt.

#### 1.3 Untersuchungsziel

Mit FEM-Programmen werden Verformungs- und Stabilitätsanalysen für geotechnische Problemstellungen durchgeführt. Ziel des Projektes ist es, in Zusammenarbeit mit der Firma Plaxis B.V. und dem Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart, das von der BAW für ihre Aufgabenerledigung eingesetzte FEM-Programm „Plaxis“ so zu erweitern, dass Versagensmechanismen im Boden realistischer



abgebildet werden können. Die Entwicklung der Mechanismen soll dabei unabhängig von der Diskretisierung des Problems in finite Elemente sein und das Entfestigungsverhalten von Böden nach Erreichen der maximalen Scherfestigkeit berücksichtigen. Um der wichtigen Rolle des Grundwassers bei der Beschreibung des Bodenverhaltens Rechnung zu tragen, soll dieses in einem weiteren Schritt im Berechnungsmodell berücksichtigt werden.

## 2 Untersuchungsmethoden

Die Grundlagen zur Modellierung von Bruchvorgängen wurden im Rahmen einer Literaturstudie zusammengetragen. Darauf aufbauend wurde ein Modell im FEM- Programm „Plaxis“ implementiert, mit welchem Scherfugen als Diskontinuum modelliert werden können. Anhand von Berechnungsbeispielen können nun weitergehende Fragestellungen untersucht werden.

## 3 Ergebnisse

### a) Erweiterte Finite Elemente Methode (X-FEM)

Eine auf dem „Partition of Unity“-Konzept basierende Erweiterung der Finite Elemente Methode ist in „Plaxis“ implementiert worden, was die Berücksichtigung von Diskontinuitäten prinzipiell ermöglicht. Dabei wird das vom Ort  $\mathbf{x}$  abhängige Verschiebungsfeld  $\mathbf{u}$  des untersuchten Körpers in einen kontinuierlichen Anteil  $\mathbf{u}_k$  und einen diskontinuierlichen Anteil zerlegt:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \mathbf{u}_k(\mathbf{x}) + H_S(\mathbf{x}) \mathbf{u}_S(\mathbf{x})$$

Die Heaviside Funktion  $H_S$ , deren Zentrum die Scherfuge  $S$  darstellt, ist gleich 0 im Teilkörper  $\Omega^-$  und gleich 1 im Teilkörper  $\Omega^+$  (vgl. Bild 2). Der Verschiebungssprung  $\mathbf{u}_S$  zwischen den durch die Scherfuge getrennten Teilkörpern wird durch zusätzlich ins Berechnungsmodell eingeführte Freiheitsgrade beschrieben.

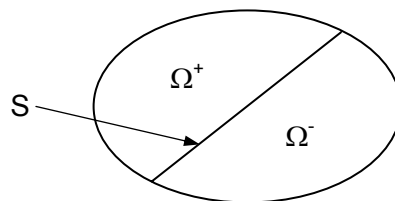


Bild 2: Schematische Darstellung eines durch die Diskontinuität  $S$  getrennten Körpers  $\Omega$

### b) Stoffgesetz in der Scherfuge

In der sich ausbildenden Scherfuge wird das Stoffgesetz von Mohr-Coulomb verwendet. Zur Berücksichtigung des Entfestigungsverhaltens wird die Kohäsion  $c'$  nicht als konstant, sondern in Abhängigkeit von den plastischen Scherdehnungen definiert. Sie nimmt mit steigenden plastischen Scherdehnungen in der Scherfuge bis auf Null ab, d.h. die kohäsiven Haltekräfte zwischen den Partikeln verringern sich bei fortschreitender Relativbewegung. Dieses Verhalten wird als Kohäsionsentfestigung bezeichnet (s. Bild 3).

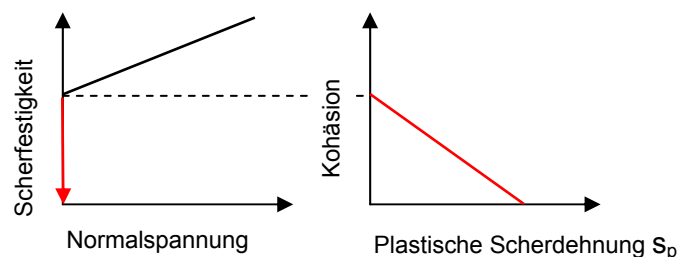


Bild 3: Mohr-Coulombsche Bruchgerade mit linearer Kohäsionsentfestigung

### c) Entstehung und Ausbreitung der Scherfuge

Bei der Untersuchung der Entstehung und Ausbreitung von Scherfugen sind folgende Fragestellungen zu beantworten:

1. Wo ist der geometrische Anfangspunkt der Scherfuge ?
2. Wann beginnt sich die Scherfuge dort zu bilden ?
3. In welcher Richtung und unter welchen Randbedingungen breitet sich die Scherfuge weiter aus ?

Der geometrische Anfangspunkt wird derzeit ebenso wie der Startzeitpunkt noch manuell vorgegeben. Die Richtung der Scherfuge wird anhand der Ergebnisse der FEM-Berechnung vor der Einführung der zusätzlichen Freiheitsgrade im Bereich der Scherfuge ermittelt. Hier hat sich der Gradient der inkrementellen Verschiebungen der FE-Lösung als guter Indikator erwiesen. Diese vektorielle Größe wird daher zur Bestimmung der Anfangs- und Ausbreitungsrichtung verwendet. Ein Berechnungsbeispiel ist in Bild 4 dargestellt.

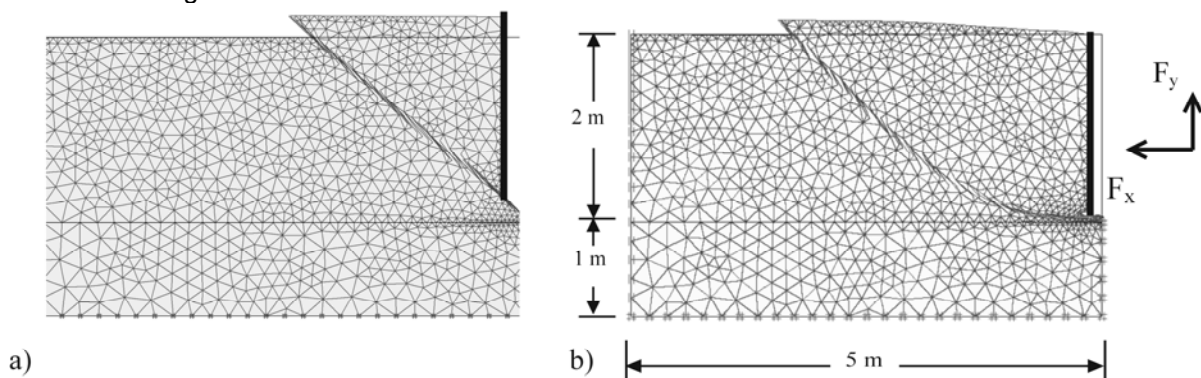


Bild 4: Berechnete Versagensmechanismen für die a) glatte und b) rauhe passive Wand

Es wird ein 5 m breiter und 3 m hoher Bodenkörper betrachtet, der durch eine sich in Richtung des Körpers bewegende starre Wand belastet wird. Diese Belastung wird durch eine Verschiebungsrandbedingung am rechten Modellrand simuliert. Die vorgegebenen Verschiebungen werden solange gesteigert, bis sich die Scherfuge im Boden komplett ausgebildet hat. Die Berechnung erfolgt einmal ohne und einmal mit Berücksichtigung der Reibung zwischen Boden und Wand. Für die glatte, d.h. reibungsfreie Wand bildet sich eine gerade, für die rauhe Wand eine gekrümmte Scherfuge aus, was auch mit theoretischen Lösungen dieses Problems korrespondiert.

Im Jahr 2009 konnte das Projekt seitens der BAW aufgrund anderer Tätigkeitsschwerpunkte nicht weiter bearbeitet werden. Die bisher durchgeführten Arbeiten sind durch einen Abschlussbericht dokumentiert. Die Anwendung des entwickelten Verfahrens für praktische geotechnische Problemstellungen mit komplizierten Randbedingungen ist bisher nur eingeschränkt möglich. Daher ist die Fortführung des Projekts in Zusammenarbeit mit Plaxis b. v. und dem geotechnischen Institut der Universität Trondheim geplant. Als Grundlage für weitere Untersuchungen wird derzeit die bestehende Implementierung der Methode seitens Plaxis b. v. hinsichtlich Struktur und Dokumentation überarbeitet.

Es besteht noch weiterer Forschungsbedarf zur Entstehung und Ausbreitung der Scherfuge und zur Berücksichtigung des Grundwassers (z.B. bei der Berechnung einer progressiven Fortpflanzung der Scherfuge in Böschungen aus bindigen Böden). Weiterhin müssen zur Abbildung praktischer Probleme Struktur- und Interfacelemente in X-FEM integriert werden.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Weitere Untersuchungen zur Entstehung und Ausbreitung der Scherfuge  
Erweiterung des verwendeten Stoffgesetzes in der Scherfuge  
Modellerweiterungen (Integration von Struktur- und Interfacelementen)  
Untersuchung von Berechnungsbeispielen (z.B. Grundbruch, Böschungsstabilität)  
Abschluss des Projektes voraussichtlich 2014

## **Hydraulischer Grundbruch in bindigem Boden**

**Netzplan-Nr.:** A39520305730

**Projektleiterin:** Dipl.-Ing. Ch. Laursen, Abteilung Geotechnik, Referat Grundwasser (G3)

**E-Mail:** charlotte.laursen@baw.de

Dipl.-Ing. R.-B. Wudtke, Prof.- Dr.-Ing. K. J. Witt  
Bauhaus-Universität Weimar, Professur Grundbau

### **1 Problemstellung und Ziel**

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

Die Auswirkungen von aufwärts gerichteten Grundwasserströmungen auf einen durchgängig bindigen Boden (z. B. Auflockerung und Veränderung der Bodenstruktur) sind bisher nur unzureichend bekannt. In Ermangelung von Ansätzen, welche die bindigen Eigenschaften von Böden umfassend berücksichtigen, werden die Berechnungsverfahren, die für nichtbindige Böden entwickelt wurden, bodenunabhängig angewendet. Da bei diesen Ansätzen die Oberflächenkräfte (Kohäsion) zwischen den sehr feinen Bodenpartikeln bindiger Böden, die beim Versagen in Form eines hydraulischen Grundbruchs als haltende Kräfte wirken würden, vernachlässigt werden, ergeben diese Nachweise geringere Sicherheiten, als dies bei Berücksichtigung dieser Kräfte der Fall wäre.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Der Hydraulische Grundbruch ist neben dem Auftrieb und dem Erosionsgrundbruch die wesentliche hydraulische Versagensform. Beim Bau von Baugruben im Grundwasser und bei der Unterströmung von Bauwerken ist diese Versagensform meist der maßgebende Grenzzustand der Tragfähigkeit. Während der Grenzzustand in nichtbindigen Böden hinreichend realistisch bodenmechanisch beschrieben werden kann, gibt es für ein Versagen bindiger Böden nur erste grobe statische Betrachtungen, Zeiteffekte werden bisher gar nicht berücksichtigt. Die nicht unerheblichen Sicherheitsreserven durch die Kohäsion bleiben somit unberücksichtigt. Eine Weiterentwicklung der bisher bestehenden Nachweise wäre somit von erheblichem wirtschaftlichem Nutzen für die WSV.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Ziel des Forschungsvorhabens besteht in der Untersuchung der Versagensmechanismen in bindigen Böden, die Wasserströmungen mit entsprechend hohen hydraulischen Gradienten ausgesetzt sind. Durch numerische, analytische und versuchstechnische Analysen sollen Erkenntnisse gewonnen werden, die es ermöglichen einen wirklichkeitsnahen Ansatz zum rechnerischen Nachweis des hydraulischen Grundbruchs abzuleiten.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Für die Bearbeitung der oben beschriebenen Fragestellungen sind sowohl theoretische Beobachtungen als auch die Durchführung von Versuchen vorgesehen. Die Ergebnisse der theoretischen Untersuchungen, resultierend aus analytischen und numerischen Ansätzen zur Analyse von Spannungs- und Verformungszuständen sowie von hydraulisch verursachten Versagensformen im bindigen Böden, sind Grundlage der Herleitung des Bemessungsansatzes und werden durch die Ergebnisse von qualitativen und quantitativen Versuche zur Untersuchung der Versagensart ergänzt und begründet.

### **3 Ergebnisse**

In einem ersten Schritt wurde Prof. Witt (Bauhaus-Universität Weimar) mit der Untersuchung hydraulisch bedingter Versagensformen in Baugrubensohlen sowie der Analyse der an einer Baugrubenwand in bindigem Boden gültigen Spannungszustände und Grenzbedingungen beauftragt.

2005 wurde von Prof. Witt eine Studie zu hydraulisch bedingten Versagensformen in der Sohle von Baugruben vorgelegt. Hierin wurden die wichtigsten durch Wasser hervorgerufenen Transportmechanismen und Versagensformen aufgezeigt sowie eine Detailanalyse zu Nachweismethoden und Be-

messungsregeln durchgeführt. Abschließend wurde eine vereinfachte Grenzzustandsfunktion abgeleitet.

Im Jahre 2006 wurde ebenfalls von Prof. Witt eine Studie zu Spannungszuständen und Grenzbedingungen beim hydraulischen Grundbruch erarbeitet mit dem Ziel, die vereinfachte Grenzzustandsfunktion zu verbessern. Außerdem wurde überprüft, ob die zunächst nicht betrachteten Parameter wie Festigkeit, Oberflächenspannung und initiale Deformation relevant sind und ob für das Versagen ggf. Bruchvorgänge maßgebend sind, die bei hohen Wasserüberdrücken im Boden und Fels beobachtet werden (hydraulic fracturing).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass für zumindest schwach bindigen Boden in erster Näherung eine Modellierung des Grenzzustandes als Starrkörperversagen angemessen ist. Weiterhin lässt sich ableiten, dass mit zunehmender Kohäsion und Einspannung des Bodens im Bereich des Wandfußes bei hohen Porenwasserdrücken das Versagen nicht in einem Starrkörperbruchmechanismus, sondern initial in einem Aufreißen der Bodenstruktur im Sinne eines hydraulic fracturing besteht. Der Ort und die Richtung der Rissinitiation werden durch die Größe und Richtung der Hauptspannungen bestimmt, die neben den Gewicht- und Strömungskräften von den Auflagerkräften der umströmten Baugrubenwand mit beeinflusst werden. Bild 1 zeigt qualitativ die Abhängigkeit der Versagensformen von Kohäsion und hydraulischem Gradienten.

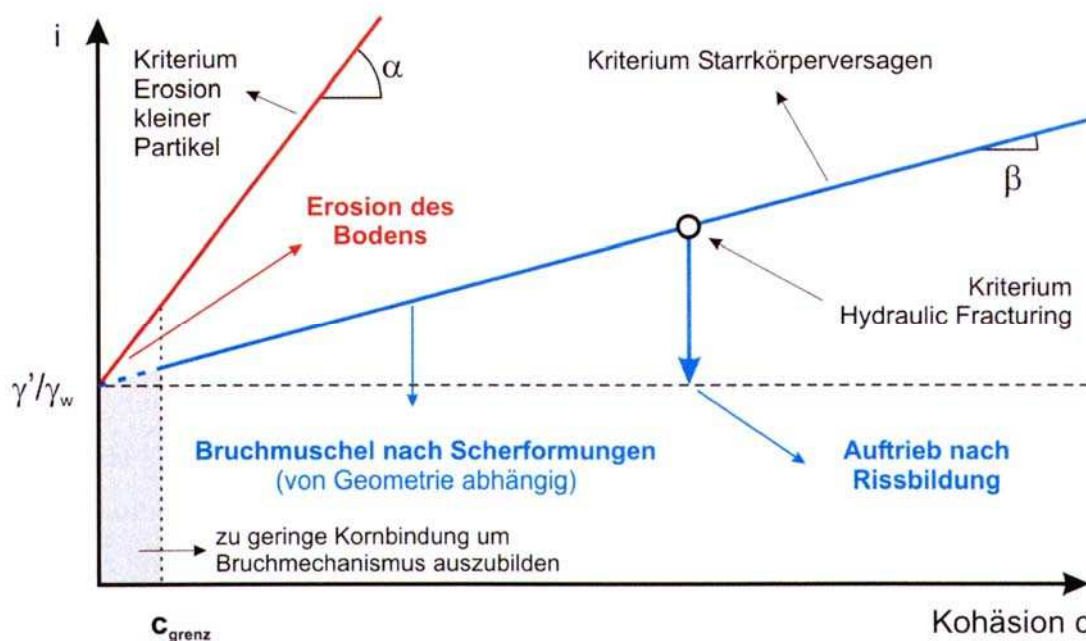


Bild 1: Definition der Versagensformen auf Grundlage von Kohäsion und hydraulischem Gradienten

Um die theoretischen Erkenntnisse der Studie „Spannungszustände und Grenzbedingungen an einer Baugrubenwand in bindigem Boden“ weiter zu verfeinern wurden Versuche zur qualitativen Erfassung des Grenzzustandes durchgeführt (vgl. Studie „Visualisierung des durch Strömung verursachten Bruchverhaltens in bindigen Böden“). Als Ergebnis der Versuche lässt sich der Versagensablauf beschreiben durch eine initiale Schädigung in Form einer Rissentstehung gefolgt von einer hydraulisch verursachten strukturellen Zerstörung des Bodenkontinuums, an das sich schließlich ein abruptes Versagen der abstromseitigen Bodenoberfläche anschließt, wobei sich ein diskreter Bodenkörper formiert.

Im Rahmen der Studie "Analyse zur Rissinitiation und Einfluss der Auflagerreaktion beim hydraulischen Grundbruch", die 2007 bearbeitet wurde, wurden verschiedene Möglichkeiten zur Ermittlung des Grenzzustandes einer hydraulisch verursachten Rissentstehung im bindigen Boden untersucht. Hierzu zählen die Betrachtung des Spannungszustandes an einer Pore bei Aufweitung der Pore verursacht durch Erhöhung des Poreninnendruckes, die Bruchtheorie nach Griffith und die Rissanalyse bei

Anwendungen der Theorie der linear elastischen Bruchmechanik (LEBM) als Applikation für bindigen Boden.

Bei Annahme einer Porenaufweitung wird der Grenzzustand allein durch den lokalen Spannungszustand bestimmt. Bodendeformationen und Variabilitäten der Spannungsverteilung im umliegenden Bodenkontinuum werden hierbei nicht berücksichtigt. Die Anwendung der Bruchtheorie nach Griffith ermöglicht zwar die Berücksichtigung der Deformationseigenschaften des umliegenden Materials, wird jedoch stark von der zugrunde gelegten Schädigung (Risslänge) bestimmt. Die außerdem hinsichtlich einer Anwendbarkeit als Grenzkriterium analysierte LEBM ermöglicht neben der Darstellung der Auswirkungen verschiedener Einflüsse auf das Bodenkontinuum, wie Normal- und Schubbeanspruchungen, die Berücksichtigung veränderlicher Spannungsverhältnisse, wie diese beispielsweise an einer Baugrubenwand relevant sind.

Im zweiten Teil der Studie wurden insbesondere die Auswirkungen der durch die Widerlagerwirkung eines Baugrubenverbaus im Boden aktivierten Verspannung auf den Grenzzustand des hydraulischen Grundbuches untersucht. Hierbei kamen vor allem numerische Verfahren (Plaxis) zur Anwendung. Als Ergebnis ist festzustellen, dass ein direkter Zusammenhang zwischen einer im bindigen Boden als tragfähig beurteilten Stützkonstruktion und einer dadurch auch ausreichenden Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch nicht gegeben ist. Es wurde insbesondere belegt, dass bei der Analyse des Versagens durch einen hydraulischen Grundbruch im bindigen Boden der Spannungszustand und der Wassergehalts des Bodens wesentlich für die Beurteilung der Tragfähigkeit des Bodenwiderlagers sind.

Zur Komplettierung der theoretischen Ergebnisse und Ansätze wurden Versuche ausgeführt, um die Zugfestigkeit unterschiedlich bindiger Böden bei ungesättigten und gesättigten Baugrundverhältnissen anhand indirekter und direkter Analyseverfahren zu messen (vgl. Studie „Zugfestigkeit bindiger Böden“).

Da beim hydraulischen Grundbruch im bindigen Baugrund nicht eine mechanische sondern vielmehr eine hydraulische Bodenzerstörung dominant ist, wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, mit dem insbesondere die bei einer entsprechenden Einwirkung aktivierte Zugfestigkeit analysiert werden kann. Bei diesem Versuch wird eine in einem Zylinder definiert eingebaute bindige Bodenprobe ausgehend von einer zentralen Bohrung radial durchströmt, wobei der Gradient sukzessive gesteigert wird. Drücke, Wassermengen und Verformungen der Oberfläche werden gemessen. Neben dem Einfluss der Versuchsmethode wurde auch der Einfluss des Spannungszustandes auf die bodenspezifisch aktivierbare Zugfestigkeit analysiert (vgl. Studie „Untersuchung der hydraulisch bedingten Rissinitiation in bindigem Boden – hydraulische Zugfestigkeit“). Als wesentliches Ergebnis der Versuche kann festgestellt werden, dass die Randbedingungen totaler Spannungszustand, Wassergehalt und Porenanteil bei den für einen hydraulischen Grundbruch in bindigem Boden relevanten Grenzstandsbedingungen eine gegenseitige Abhängigkeit aufweisen. Für einen bestimmten Satz der Randbedingungen existiert eine noch realisierbare, bodenspezifische, effektive Spannung, die als Grenzstandsbedingung der Zugfestigkeit des Materials entspricht.

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

Inhalt des abschließenden Untersuchungsschrittes ist die Herleitung eines begründeten Bemessungsansatzes gegen einen hydraulischen Grundbruch in bindigem Boden. Hierbei werden insbesondere die Erkenntnisse des im bindigen Boden gültigen Versagensablaufes als für einen bestimmten Versagensfortschritt relevante Widerstandsanteile berücksichtigt. Im Fokus steht hierbei die Entwicklung eines Entscheidungsbaumes zur Identifikation der an unterschiedlichen Baugrubensituationen relevanten Versagensarten als Grundlage der Ermittlung des gültigen Berechnungsverfahrens im bindigen Boden. Die Möglichkeiten des Verfahrens werden an einem exemplarischen Beispiel dargestellt. Das Vorhaben soll Ende 2011 abgeschlossen werden.

## 5 Literatur

- [1] Wudtke, R.-B.; Witt, K. J.: "A static Analysis of Hydraulic Heave in Cohesive Soil", Proceedings of the 3rd International Conference on Scour and Erosion, 01.-03.11.2006, Amsterdam, CURNET, S. 251
- [2] Witt, K. J.; Wudtke, R.-B.: "Versagensmechanismen des Hydraulischen Grundbruchs an einer Baugrubenwand", 22. Christian Veder Kolloquium, 12.-13.04.2007, Graz, S. 229 – 242
- [3] Wudtke, R.-B.; Witt, K. J.: "Phänomene des Hydraulischen Grundbruches an Baugrubenwänden", Johann-Ohde-Kolloquium 2007, BAW & TU Dresden, 15.11.2007, Hannover, S. 1 – 7
- [4] Wudtke, R.-B.; Witt, K. J.: "Einfluss von Bodenwiderständen beim Hydraulischen Grundbruch", 6. Kolloquium "Bauen in Boden und Fels", 22.-23.01.2008, Ostfildern, S. 147 – 153
- [5] Wudtke, R.-B.: "Failure Mechanisms of Hydraulic Heave at Excavations", Proceedings of the 19. Young Geotechnical Engineers' Conference (EYGEC) 2008, 04.-06.09.2008, Győr (Ungarn), S. 331 – 338
- [6] Wudtke, R.-B.: "Grenzzustände beim Hydraulischen Grundbruch an Baugrubenwänden", Spezialsitzung "Forum für junge Geotechnik-Ingenieure", 30. Baugrundtagung, 24.-27.09.2008, Dortmund, S. 44 – 45

## **Bestandsaufnahme vorhandener Deckwerke in den Wasserstraßen der WSV**

**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 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“ (GGB), die die theoretischen Bemessungsgrundlagen nach dem derzeitigen Stand der Technik beinhalten. Zur Erleichterung der Anwendbarkeit des GGB wurden die Berechnungsalgorithmen zusätzlich in einer Software „GGBSoft“ 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, 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 von 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, durch Präzisierung der theoretischen Grundlagen auf der Basis der Ergebnisse der Bestandsaufnahme die Deckwerkbauweisen an Binnenwasserstraßen 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 zunehmend weiter optimiert werden können.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Folgende Untersuchungsmethoden kommen zur Anwendung:

- Erfassung des Zustandes der Deckwerke, der technischen Randbedingungen (Geometrie, Baugrund) in situ und 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 GGBSoft, 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 die Bemessung und Ausführung von Deckwerken.

### **3 Ergebnisse**

Bisher wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Deckwerke in 8 unterschiedlichen Wasserstraßenabschnitten begutachtet: in der Süd- und der Nordstrecke des Dortmund- Ems-Kanals, am Wesel-Datteln-Kanal, am Main-Donau-Kanal, am Mittellandkanal und der Unteren Havel-Wasserstraße. Die Ergebnisse wurden ausgewertet und in Teilberichten dargestellt. Auf deren Grundlage wurden erste Hinweise zur Optimierung der Bemessungsansätze des GBB gegeben, die bei der Weiterentwicklung der Berechnungsansätze berücksichtigt wurden.

Nachdem in den letzten 10 Jahren sehr intensiv an dem Forschungsprojekt gearbeitet wurde, konnten 2009 aufgrund anderer Prioritäten keine neuen praktischen Untersuchungen vor Ort durchgeführt werden.

### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Folgende Arbeiten sind in den nächsten 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,
- Untersuchungen an bestehenden verklammerten Deckwerken am MLK.

Aufgrund der z. T. langjährigen Beobachtung von Teilstrecken und zur Umsetzung des umfangreichen Untersuchungsprogramms wird das Forschungsvorhaben noch ca. 5 Jahre in Anspruch nehmen.



## **Bemessung von geotechnischen Filtern unter instationärer Belastung**

**Netzplan-Nr.:** A39520410076

**Projektleiterin:** Dipl.-Ing. J. Eisenmann, Abteilung Geotechnik, Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

**E-Mail:** jeannine.eisenmann@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 Erddambau und Deponiebau des Instituts für Boden- und Felsmechanik (IBF) der Universität Karlsruhe (TH) hat von November 2003 bis zum Juni 2006 im Rahmen des F&E Vorhabens Versuche durchgeführt und die Versuchsergebnisse in einem Endbericht dokumentiert. Die hierbei angewendeten Untersuchungsmethoden wurden im letzten Jahr bereits erläutert.

Zur Untersuchung der hieraus abgeleiteten weiteren Fragestellungen wurde eine vollständige Überarbeitung der Wechseldurchströmungsanlage erforderlich. Mit Hilfe der neuen Anlage sollen die üblicherweise an Wasserstraßen auftretenden hydraulischen Druckwechselbelastungen bei gleichzeitiger Durchströmung der Probe aufgebracht werden können. Bei den in der Wasserstraße üblichen Drücken bis 4 m Wassertiefe können hierbei Porenwasserüberdrücke entstehen. 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. Neben der präzisen Steuerung der aufgetragenen Druckwechselbelastung sollen mit der neuen Anlage auch verschiedene Drücke sowie der Wasserdurchfluss durch die Anlage gemessen werden können. Hierbei können je nach Durchlässigkeit der eingebauten Bodenprobe unterschiedliche Messbereiche verwendet werden. Eine Skizze der neuen Versuchsanlage ist in Bild 1 dargestellt.

Zur Vorbereitung der Versuche in der neuen Anlage wurden im Rahmen einer Diplomarbeit Ende 2007 Versuche an der Filterversuchsanlage durchgeführt. Hierbei lag der Schwerpunkt auf der Optimierung der Messtechnik zur Ermittlung der Einbaurandbedingungen und der Porenwasserdruckmesstechnik insbesondere bei feinkörnigen, nicht bindigen Böden (Grobschluffen und Feinsanden).

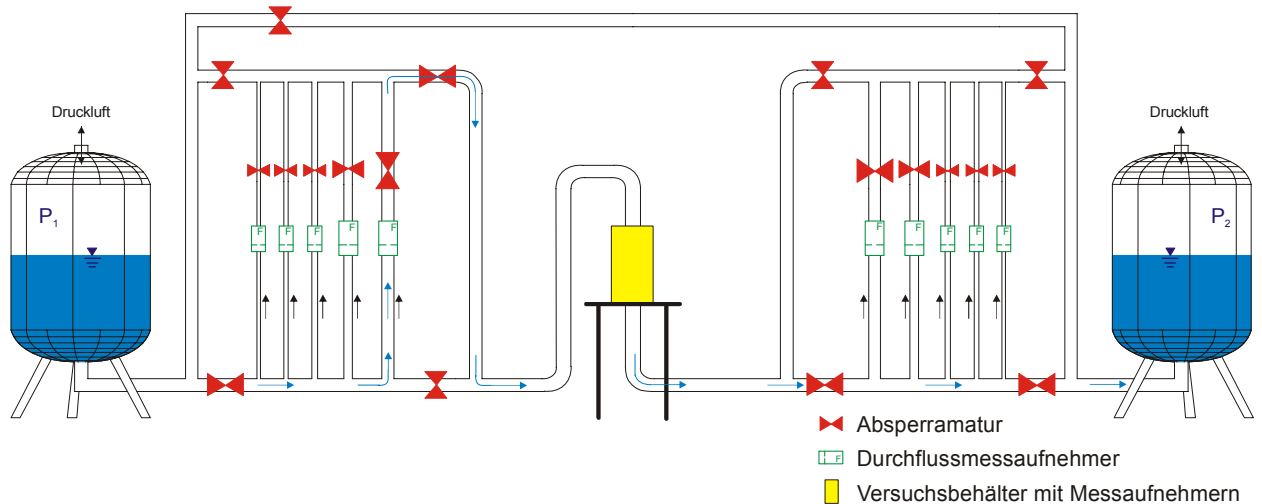


Bild 1: Skizze der neuen Wechseldurchströmungsanlage

### 3 Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurde die neue Anlage weiter aufgebaut, aufgrund der personellen Situation konnten die Arbeiten jedoch nicht abgeschlossen werden. Bezüglich der Ergebnisse der Versuche der Universität Karlsruhe sei auf den letzten Bericht verwiesen. Aus den Versuchen, die im Rahmen der Diplomarbeit durchgeführt wurden, lässt sich ableiten, dass für eine zuverlässige Messung der instationären Porenwasserüberdrücke bei schnellen Druckwechselbeanspruchungen, die Anschlusstechnik der Aufnehmer verbessert werden muss. Insbesondere eine Entlüftung im eingebauten Zustand muss für die weiteren Versuche ermöglicht werden.

An der völlig überarbeiteten Wechseldurchströmungsanlage steht zunächst eine intensive Prüfung der Anlage und Optimierung der Steuerung im Vordergrund. Diese Arbeiten werden zunächst ohne Beteiligung eines externen Kooperationspartners durchgeführt. Im Anschluss daran werden die bereits von Universität Karlsruhe verwendeten Materialkombinationen systematisch in der Wechseldurchströmungsanlage untersucht. Im Anschluss daran sollen auch geotextile Filter untersucht werden.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das weitere Arbeitsprogramm ist folgendermaßen geplant:

- 2010: Fertigstellung und Prüfung der neuen Wechseldurchströmungsanlage mit Optimierung der Steuerung.  
Erarbeiten einer verbesserten Messtechnik zur Bestimmung der Porenwasserüberdrücke.  
Konzeption eines neuen Probenbehälters, der einen Schichtweisen Ein- und Ausbau ermöglicht.
- 2011: Systematische Untersuchung der bereits von der Universität Karlsruhe untersuchten Materialkombinationen.  
Prüfung von Geotextilien als Grundlage für die Überarbeitung des MAG.

## **Alternative 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 infolge hydraulischer Belastung aus Schifffahrt zu schützen, werden diese in der Regel mit technischen Deckwerken aus Steinschüttungen oder Spundwänden gesichert. Grundlage der Anwendung ist ein breites Regelwerk der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Seit Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) im Jahr 2000 erhalten ökologische Gesichtspunkte bei allen Aus- und Neubaumaßnahmen sowie Unterhaltungsarbeiten an Wasserstraßen zunehmend einen größeren Stellenwert. Dementsprechend sind verstärkt naturnahe, technisch-biologische Ufersicherungen als Alternative zur klassischen Steinschüttung anzuwenden. Für deren Einsatz an Wasserstraßen gibt es bisher allerdings nur sehr wenig Erfahrungen und noch keine Regelwerke. Aus diesem Grund werden seit einigen Jahren in einem Gemeinschaftsprojekt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Untersuchungen zur hydraulischen Belastbarkeit alternativer technisch-biologischer Ufersicherungen unter Berücksichtigung der Schifffahrt 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 alternativen technisch-biologischen Ufersicherungen zur Verfügung gestellt. Damit steht eine wichtige Entscheidungshilfe zur Verfügung, wenn im Rahmen von Unterhaltungs-, Ausbau- und Neubaumaßnahmen an Binnenwasserstraßen anstelle konventioneller alternativer Ufersicherungsmaßnahmen angewendet werden sollen. Im Rahmen der Umsetzung der WRRL an Binnenwasserstraßen können Vorschläge der Länder zu ökologischen Uferumgestaltungen auf dieser Grundlage beurteilt und geprüft werden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Alternative technisch-biologische Ufersicherungsarten, die sich aufgrund der durchgeführten Untersuchungen als geeignet für die Anwendung an Wasserstraßen erwiesen haben, werden in einem Regelwerk zusammengestellt. Dabei wird die vorrangige Eignung für Kanäle, Flüsse oder seenartige Erweiterungen herausgestellt. Die Belastbarkeit der alternativen Ufersicherungen wird speziell hinsichtlich der besonderen Uferbelastungen infolge Schifffahrt, wie beispielsweise Wasserspiegelabsenkung, Bug- und Heckwellen, Wiederauffüllungsströmung, für die es bisher so gut wie keine Erfahrungswerte gibt, quantifiziert. Hinweise für Einbau und Unterhaltung werden gegeben.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Da das Projekt eine Gemeinschaftsarbeit der Referate Erdbau und Uferschutz (G4, federführend) und Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W4), bei Bedarf auch Flusssysteme (W1) der BAW sowie der Referate Landschaftspflege/ Vegetationskunde (U3) und Tierökologie (U4) der BfG ist, können sowohl technische als auch biologische Aspekte in gleicher Weise berücksichtigt werden. Folgende Untersuchungsmethoden kommen zur Anwendung:

- Sichten und Bewerten vorhandener Literatur (Praxis, Modellversuche und Theorie) und praktischer Erfahrungen erster lokaler Anwendungen in der WSV,

- Durchführung von Naturmessungen und Untersuchungen in bestehenden und neu anzulegenden Versuchsstrecken, Registrierung der technischen und biologischen Randbedingungen sowie hydraulischen Uferbelastungen infolge Schifffahrt,
- Dokumentation und Begutachtung des Zustandes alternativer Ufersicherungen einschließlich ökologischer Bewertung der Flora und Fauna in den Versuchsstrecken,
- Ermittlung der Belastbarkeit der in den Versuchsstrecken getesteten Ufersicherungen,
- Durchführung und Auswertung von Labor- und Modellversuchen im Wellenbecken,
- Auswertung der Gesamtergebnisse, Formulierung von Bemessungsansätzen.

### 3 Ergebnisse

Um die Ergebnisse zeitnah der WSV zur Verfügung zu stellen, wurde ein gemeinsames Internet-Fachportal der BAW und BfG eingerichtet (<http://www.baw.de/ufersicherung/index.php>). Hier sind neben Veröffentlichungen und Vorträgen auch die ersten beiden schriftlichen Berichte veröffentlicht. Der erste Bericht ("Untersuchungen zu alternativen technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen, Teil 1: Veranlassung, Umfrage und internationale Recherche" BAW/BfG, Mai 2006) beinhaltet die Ergebnisse einer internationalen Literaturrecherche und einer Umfrage in der WSV zu bereits bestehenden ersten Erfahrungen mit alternativen Ufersicherungen. Im zweiten Bericht („Untersuchungen zu alternativen technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen, Teil 2: Versuchsstrecke Stolzenau/ Weser, km 241,550 – 242,300“, Oktober 2008) sind die Ergebnisse einer umfangreichen Detailuntersuchung in einer bereits vor etwa 20 Jahren angelegten Versuchsstrecke an der Mittelweser dargestellt. In dem Bericht werden alle Randbedingungen, Mess- und Untersuchungsergebnisse sowie Ergebnisse zur Belastbarkeit der vorhandenen technisch-biologischen Ufersicherungen dokumentiert.

Schwerpunkt der Arbeiten im Jahr 2009 bildeten einerseits theoretische Untersuchungen zur Wirkungsweise biologischer Ufersicherungen begleitet von ersten Labor- und Modellversuchen in der BAW und andererseits die Vorbereitungen für eine neu anzulegende Versuchsstrecke am Rhein.

Für die durchzuführenden Labor- und Modellversuche wurde ein Untersuchungsprogramm aufgestellt. Mit Hilfe spezieller Versuche in der Wellengrube der BAW wird die Belastbarkeit verschiedener alternativer Ufersicherungsarten unter definierten Randbedingungen getestet. In Laborversuchen wird die Änderung der bodenmechanischen Parameter durch den Einfluss von Wurzeln untersucht. Insgesamt geht es darum, die Mechanismen zu verstehen, wie Pflanzen im Gegensatz zu technischen Ufersicherungen die Standsicherheit eines geböschten Ufers an Wasserstraßen gewährleisten können.

Auf der Grundlage der bisherigen Erkenntnisse begannen 2009 die Vorbereitungen, um in Zusammenarbeit mit dem WSA Mannheim einen 1 km langen Rheinabschnitt bei Worms, km 440,6 - km 441,6, rechtes Ufer, ökologisch umzugestalten und die vorhandenen technischen Deckwerke (Steinschüttung und z. T. altes Pflaster) durch alternative technisch-biologische Ufersicherungen zu ersetzen. Das Ziel dieser Maßnahme besteht darin, verschiedene alternative Ufersicherungsarten unter ähnlichen Randbedingungen in einem Naturversuch zu testen, um Empfehlungen für weitere Uferumgestaltungen im Zuge der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie am Rhein und ggf. anderen Wasserstraßen geben zu können.

In einem ersten Schritt erfolgten am betreffenden Rheinabschnitt umfangreiche Voruntersuchungen zur Ermittlung der maßgebenden Randbedingungen im Untersuchungsbereich. Die derzeit vorhandene Steinschüttung aus Steinen der Klasse LMB<sub>5/40</sub> ist durch regelmäßige Unterhaltungsarbeiten etwa in einer Dicke von 0,6 bis 1,2 m vorhanden. Die Böschungen sind im Mittel 1:2 bis 1:3 geneigt. Im Böschungsbereich stehen überwiegend kiesige Sande mit relativ großer Durchlässigkeit an. Der Anfang der Versuchsstrecke bei km 440,6 liegt noch im Prallhangbereich, der jedoch bis km 441,6 allmählich in einen Gleithang übergeht. Die Fahrrinne ist dementsprechend bei km 440,6 relativ nah am Ufer (minimaler Abstand: ca. 25 m), bei km 441,6 beträgt der minimale Abstand dagegen ca. 140 m. Die im Böschungsbereich örtlich vorhandene Vegetation wurde von der BfG aufgenommen und bewertet. Danach sind größtenteils Arten geringer bis mittlerer Wertigkeit vorhanden. Es gibt einige erhaltenswerte Gebüschelemente, aber insgesamt ist die Strukturvielfalt gering. Eine natürliche Uferzonierung fehlt. Erst ab km 441,350 ist ein ökologisch hochwertiger Bereich vorhanden. Zu erwartende Strömungsbelastungen bei Hochwasser wurden anhand bereits in der BAW vorhandener hyd-

ronumerischer Modelle abgeschätzt. Die hydraulische Uferbelastung infolge Schifffahrt wurde in einer 7-tägigen Messkampagne ermittelt. Dabei wurden 552 Schiffe mit ihren Daten einschließlich Uferabstand und Schiffsgeschwindigkeit registriert und die Wasserspiegelauslenkungen sowie die Strömungsgeschwindigkeiten am Ufer gemessen. Parallel dazu wurden bei verschiedenen Rheinwasserständen die hydraulischen Belastungen und die sich daraus ergebenden erforderlichen Deckwerke mit der Software GGBSoft theoretisch ermittelt. Die Auswertungen laufen noch.

Zeitgleich erfolgten unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Voruntersuchungen bereits die Planungen für die neuen alternativen Ufersicherungen. Auf der 1 km langen Versuchsstrecke werden 9 Abschnitte unterschiedlich gestaltet. Dabei gibt es 5 Abschnitte, in denen die vorhandene Steinschüttung oberhalb der Mittelwasserlinie vollständig entfernt wird. Alternativ werden Spreitlagen (quer und längs zur Fließrichtung – Varianten 2 und 3), Kammerdeckwerke und Röhrichtgabionen (Variante 5, siehe Bild 1), Böschungsschuttmatten und Röhrichtmatten (Variante 7) angeordnet. Am Ende der Versuchsstrecke ist eine „Nullvariante“ (Variante 9) vorgesehen, bei der die entsteinte Böschung einer natürlichen Sukzession überlassen wird.

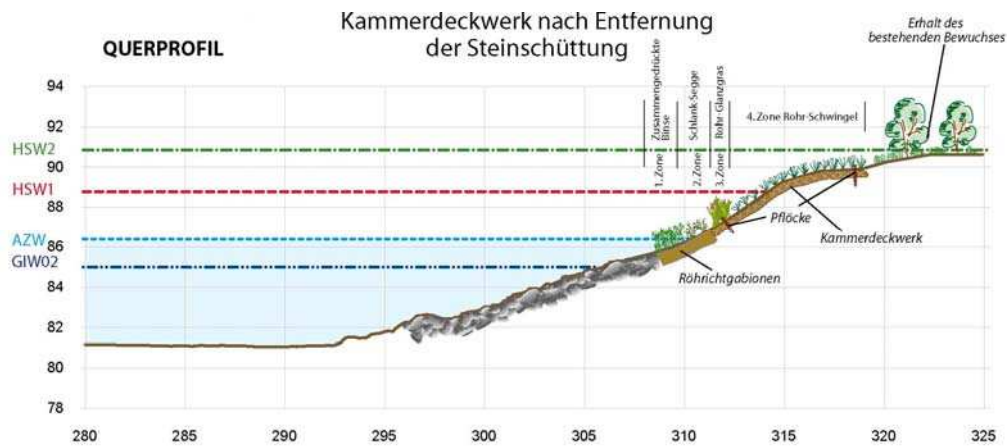


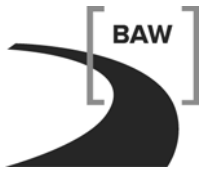
Bild 1: Versuchsstrecke am Rhein - Geplante Variante 5 „Kammerdeckwerk und Röhrichtgabionen“

In den übrigen Bereichen bleibt die Steinschüttung erhalten und wird durch Einbeziehung von Pflanzen ökologisch aufgewertet. Die Untersuchung dieser technisch-biologischen Varianten ist wichtig, um ökologische Verbesserungen auch dort zu ermöglichen, wo aus hydraulischen Gründen nicht auf eine Steinschüttung verzichtet werden kann. Eine Aufwertung erfolgt durch Setzstangen (Variante 1), Überschüttung mit Kies (Variante 4), Begrünung mit Gräserkräutern und Bepflanzung (Variante 6). Im Abschnitt 8 sollen bessere Bedingungen für zum Teil bereits vorhandene Röhrichte durch Anordnung eines Steinwalls geschaffen werden. Bei diesen Varianten kann erhaltenswerter Bewuchs gut integriert werden.

Die Bauausführung in der Versuchsstrecke am Rhein ist für März/ April 2011 geplant. Begleitet wird die Maßnahme von einem über mehrere Jahre dauernden umfangreichen Monitoringprogramm. Dabei wird die Vegetationsentwicklung dokumentiert, die Uferstabilität kontrolliert, die hydraulischen Belastungen bei verschiedenen Wasserständen gemessen und die Entwicklung der Fauna beobachtet. Zur ökologischen Bewertung werden von der BfG in diesem Jahr bereits zum Vergleich Untersuchungen zur Fauna (Laufkäfer, Spinnen, Vögel, Reptilien, Makrozoobenthos und Fische) durchgeführt. Auch alle anderen Faktoren, die die Dauerhaftigkeit biologischer Ufersicherungen beeinflussen - wie z.B. Überflutungszeiten, Niederschläge, Trockenzeiten, Beschattung, Vandalismus - werden erfasst und mit ausgewertet.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Ab 2010 werden die Labor- und Modellversuche mit verschiedenen alternativen Ufersicherungsarten intensiviert. Die Ausführung der Versuchsstrecke am Rhein wird begleitet und das Monitoring durchgeführt. Parallel dazu werden die Untersuchungen in ausgewählten bestehenden Wasserstraßenab-



schnitten mit alternativen Ufersicherungen fortgesetzt. Durch Mitarbeit im DWA-Ausschuss 1.5 „Alternative Ufersicherungen“ und in der 2009 gegründeten PIANC-Working Group InCom WG 128 „Alternative Bank Protection Methods for Inland Waterways“ erfolgt ein intensiver Austausch mit Fachkollegen auf nationaler und internationaler Ebene. Insgesamt wird das Forschungsvorhaben noch mindestens 5 Jahre in Anspruch nehmen.

## **5 Literatur**

Alle Veröffentlichungen und Vorträge, die 2009 im Rahmen des FuE-Vorhabens realisiert wurden, sind im Internetportal <http://www.baw.de/ufersicherung/index.php> abrufbar. Teilergebnisse werden dem planenden Ingenieur sukzessiv im Internetportal zur Verfügung gestellt.

## **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 [1]. 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.

#### **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:

- Literaturstudie
- Umfrage in der WSV (Erfahrungen, Klärungsbedarf)
- Erfahrungsaustausch innerhalb der BAW mit anderen Fachbereichen
- Labor-, Modellversuche (Dichtungsmaterialien, Anschlusskonstruktionen)
- Durchführung von geohydraulischen Berechnungen
- Zusammenstellung der Ergebnisse

### **3 Ergebnisse**

#### ***Literaturstudie***

Es wurde eine Literaturstudie hinsichtlich der Ausführung von Dichtungsanschlüssen im Wasserbau durchgeführt. Für Anschlüsse von flächigen Dichtungen an Wasserbauwerke von Wasserstraßen wurden jedoch nur vereinzelt Ausführungen in der Literatur gefunden. Diese beziehen sich i. w. auf den Anschluss von Asphaltabdichtungen an Bauwerke [2].

### Berechnungen zur Wirksamkeit von Kanaldichtungen

Als Grundlage für die Bewertung von Undichtigkeiten an Dichtungsanschlüssen wurde zunächst rechnerisch untersucht, wie die Wirksamkeit von Dichtungen hinsichtlich der Standsicherheit von unterschiedlich durchlässigen Kanaldämmen generell zu bewerten ist. Hierfür wurde ein typischer Querschnitt eines hohen Dammes mit einer Dichtung, die die Anforderungen nach ZTV-W (20 cm dick,  $k = 10^{-08}$  m/s) erfüllt, zugrunde gelegt. Es wurde die Sickerlinie im Damm und die Standsicherheit der luftseitigen Böschung für unterschiedliche Durchlässigkeiten des Dammmaterials berechnet. Der Untergrund unterhalb der Dammaufstandsfläche wurde mit  $10^{-08}$  m/s als gering durchlässig angesetzt. Die Sickerlinie im Damm fällt mit steigender Dammdurchlässigkeit, so dass der Ansatz eines gering durchlässigen Untergrunds vergleichsweise geringe Standsicherheiten der luftseitigen Böschung bewirkt.

Für die Standsicherheitsberechnungen wurde von konservativen Bodenparametern für nichtbindige Böden (Durchlässigkeit  $k \geq 10^{-06}$  m/s; Reibungswinkel  $\varphi' = 32,5^\circ$ , Kohäsion  $c' = 0$  kN/m<sup>2</sup>) bzw. für bindige Böden ( $k = 10^{-07}$  m/s:  $\varphi' = 30^\circ$ ,  $c' = 5$  kN/m<sup>2</sup>;  $k = 10^{-08}$  m/s:  $\varphi' = 30^\circ$ ,  $c' = 10$  kN/m<sup>2</sup>) im Damm ausgegangen. Für den gering durchlässigen Untergrund wurde als gewachsener Boden  $\varphi' = 25^\circ$  und  $c' = 20$  kN/m<sup>2</sup> angesetzt.

Das Rechenmodell und die ermittelten Sickerlinien sind in Abb. 1 dargestellt. Es zeigt sich, dass bei einem gegenüber der Dichtung ( $k_{\text{Dichtung}} = 10^{-08}$  m/s) um 2 Zehnerpotenzen durchlässigeren Dammmaterial ( $k_{\text{Damm}} = 10^{-06}$  m/s) bereits eine fast volle Durchströmung des Dammes mit hoher Sickerlinie einsetzt und damit die Wirkung auch einer intakten Dichtung relativ gering ist.

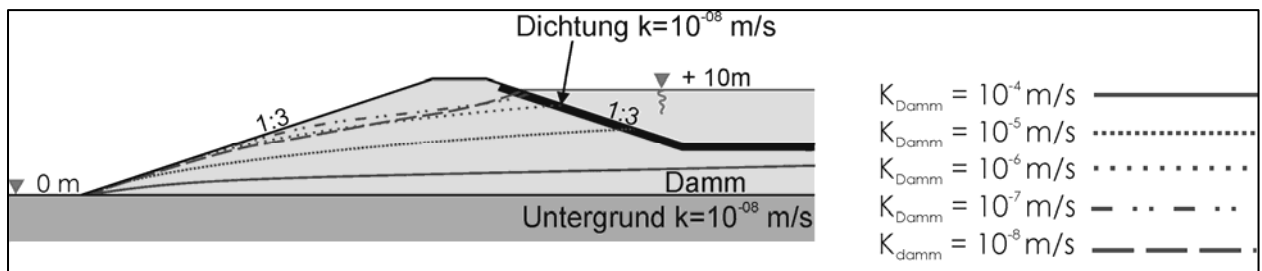


Bild 1: Rechenmodell und Sickerlinien

Für das in Bild 1 dargestellt Modell wurde die globale Dammstandsicherheit für verschiedenen Sickerlinien mit den Teilsicherheiten für den Lastfall 1 nach DIN 1054 berechnet, da bei intakter Dichtung die Durchströmung durch den Damm eine ständige Bemessungssituation ist. Die Standsicherheit des nicht durchströmten Damms ist mit Ausnutzungsgraden  $\mu < 0,7$  bei weitem ausreichend. Die Berechnungsergebnisse sind in Bild 2 als Ausnutzungsfaktor in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Dammmaterials dargestellt. Eine ausreichende Sicherheit ist bei Ausnutzungsgrades  $\mu \leq 1,0$  gegeben.



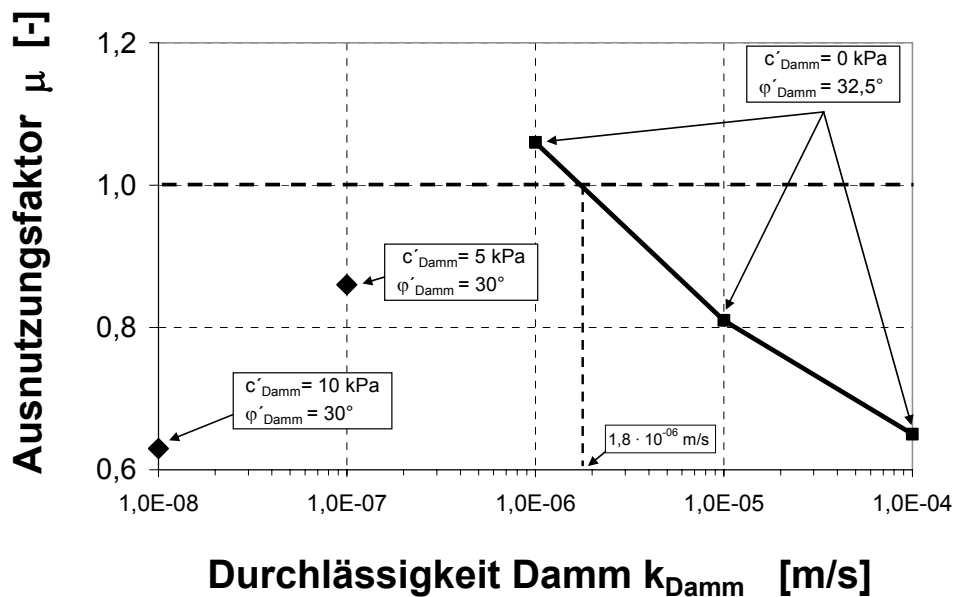


Bild 2: Ausnutzungsgrade für unterschiedliche Dammdurchlässigkeiten

Wie zu erwarten steigt der Ausnutzungsgrad mit fallender Durchlässigkeit d. h. mit steigender Sickerlinie, an. In dem berechneten Modell ist bereits ab einem Durchlässigkeitsbeiwert von  $1,8 \cdot 10^{-06}$  m/s, das entspricht z. B. einem schluffigen Feinsand, die Standsicherheit der luftseitigen Böschung nicht mehr ausreichend. Die ausreichende Sicherheit bei einer Dammdurchlässigkeit  $k \leq 10^{-07}$  m/s trotz hoher Sickerlinie ist auf die Kohäsion des bindigen Dammmaterials zurückzuführen. Böden mit einer Durchlässigkeit um  $10^{-06}$  m/s sind daher bei Dämmen für Wasserstraßen ungünstig, da sie relativ gering durchlässig (hohe Sickerlinie) und kohäsionslos (geringe Festigkeit) sind.

Für die Bewertung von Undichtigkeiten von Dichtungsanschlüssen zeigen die Berechnungsergebnisse, dass die Dichtigkeit eines Dichtungsanschlusses auch immer im Zusammenhang mit der Durchlässigkeit des umgebenden Bodens zu bewerten ist. Ist der durchströmte Boden nicht deutlich durchlässiger als die Dichtung, so sind die Auswirkungen von Fehlern im Dichtungsanschluss relativ gering da bereits eine relevante Durchströmung des Untergrundes bzw. Dammes auch ohne Leckage im Dichtungsanschluss vorhanden ist.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Geplanter weiterer Bearbeitungszeitraum ist 2010 und 2011. Zunächst soll untersucht werden, ob die Entstehung von Fugen an Dichtungsanschlüssen infolge von Herstellerarbeiten (z. B. Durchrammen einer Dichtung) numerisch simuliert werden kann. Auf einer numerischen Simulation aufbauend könnten dann in einem zweiten Schritt praktische Untersuchungen, Laborversuche und Berechnungen - ggf. durch Beteiligung weiterer BAW-Referate - durchgeführt werden.

#### 5 Literatur

- [1] Empfehlungen für die Anwendung von Oberflächendichtungen an Sohle und Böschungen an Wasserstraßen (EAO), Mtlg. Nr. 85, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- [2] Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau (EAAW), Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Essen

## **Einfluss der Vorlandvegetation auf den Hochwasserabfluss und die Sohlstabilität in Bundeswasserstraßen**

**Netzplan-Nr.:** A39530110036

**Projektleiter:** Dr.-Ing. M. Schröder, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat Flusssysteme I (W1)

**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 Gewässerbetts parametrisieren. Während der Strömungswiderstand eines sandig-kiesigen Mittelwasserbetts verhältnismäßig stringent aus der Sieblinie ermittelt werden kann, ist seine Ermittlung im Fall von über- und durchströmter Vegetation, die man außerhalb des Mittelwasserbettes im Bereich der Vorländer antrifft, außerordentlich komplex. Diese Komplexität 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 auch bei der Bewertung von Baumaßnahmen Dritter, sind auch immer Hochwasserabflüsse zu bewerten, 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). Hierbei sind insbesondere drei Aspekte entscheidend, die physikalisch-wissenschaftlich fundierte Berechnungsansätze für den Strömungswiderstand von Vegetation erfordern:

- Die Kalibrierung eines Strömungsmodells erfordert für den Lastfall Hochwasserabfluss auch entsprechende Naturmessdaten. Im Bereich von Hochwasserabflüssen sind allerdings Naturmessdaten nur spärlich verfügbar, so dass häufig mit dem für Niedrig- und Mittelwasserabfluss kalibrierten Strömungsmodell eine Extrapolation auf den Hochwasserfall erfolgen muss.
- Bei der instationären Strömungsmodellierung einer Hochwasserganglinie variiert der Strömungswiderstand von durch- und überströmter Vegetation in einem sehr weiten Spektrum und kann mit konstanten Beiwerten (z.B. Strickler-Beiwert) nicht mehr erfasst 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 Hoch-

wasserquerschnitts 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 Untersuchungsziel**

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. 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**

Der Kooperationsvertrag mit dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen wurde auch im Jahr 2009 fortgeführt. Die hydrologischen Verhältnisse gestatteten in dem Jahr allerdings keine weiteren Naturmessungen. Die Arbeit an dem Forschungsprojekt ruhte daher weitestgehend.

## **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2010 – 2012: Fortführung der Kooperation mit dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen zur Durchführung von Hochwassermessungen, um eine solide Datengrundlage zur Validierung und Weiterentwicklung der Modellansätze für durch- und überströmten Bewuchs zu erhalten. Die Hochwassermessungen sollen auf weitere Vorlandflächen ausgedehnt werden, die bereits bei geringeren Hochwasserständen überflutet werden. Damit wird auch das Ziel verfolgt, den Einfluss der jahreszeitlichen Änderungen der Vegetation auf den Strömungswiderstand durch Naturmessungen zu erfassen. Voraussetzung ist, dass neben einer Messung während eines Winterhochwassers auch eine Messung während eines Hochwassers im Sommer möglich wird.

## **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 Flusssysteme I (W1)

**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. Darüber hinaus ist eine räumliche Betrachtung der Phänomene in vielen Fällen aufgrund des komplexen Zusammenspiels zwischen Hydrodynamik und Morphodynamik unabdingbar. Gegenüber gegenständlichen Modellen mit beweglicher Sohle bieten mehrdimensionale numerische Feststofftransportmodelle (FT-Modelle) den Vorteil eines geringeren Aufwandes.

Mehrdimensionale FT-Modelle, welche zur Lösung von instationären, großskaligen Problemen benutzt werden können, haben heute bereits einen beachtlichen Entwicklungsstand erreicht. Allerdings setzt eine erfolgreiche Anwendung dieser Verfahren ein grundlegendes Verständnis der physikalischen Phänomene sowie große Erfahrung auf dem Gebiet 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. Zur numerischen Abbildung der physikalischen Prozesse sind strukturelle Vereinfachungen unumgänglich. Während die Überprüfung von rein hydrodynamischen Modellsystemen an bekannten 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 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 der mehrdimensionalen FT-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. Ein flussbauliches Systemmodell mit dem Ziel einer verbesserten Verifizierung und Einsatzerweiterung von numerischen und physikalischen Modellen wird derzeit aufgebaut.

- Verifikation 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. Die Mängel sollen entsprechend ihrer Projektrelevanz behoben werden.

## 2 Untersuchungsmethoden

Im Jahr 2009 wurden die Arbeiten zur Bewertung von Simulationsergebnissen mittels Zuverlässigkeitsanalyse weiterverfolgt. Das Fraunhofer Institut Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen hat eine von ihnen entwickelte und auf Vertrauensintervalle spezialisierte Monte-Carlo Methode (Monte Carlo CL-Methode) in Zusammenarbeit mit der BAW auf Berechnungsergebnisse von morphodynamischen mehrdimensionalen Modellen angepasst und angewendet.

In der 5m-Systemrinne konnten erste Datensätze erstellt werden, die zur Validierung von mehrdimensionalen morphodynamischen Modellen in 2010 genutzt werden sollen. Die Versuche zum Verhalten von Transportkörpern über beweglicher bzw. fester Sohle wurden mit räumlich und zeitlich hochaufgelösten und hochgenauen Messverfahren vermessen. Ziel ist ein paralleler Betrieb von physikalischen und numerischen Modellen, so dass Rückfragen, die sich aus den numerischen Modellierungen ergeben, durch weitere und ggf. detailliertere Messungen in der Systemrinne beantwortet werden können.

## 3 Ergebnisse

Im Rahmen einer Zuverlässigkeitsanalyse wurde die Monte-Carlo-CL Methode auf die morphodynamische Berechnung mit Telemac2D/Sisyphe eines etwa 10 km langen Teilabschnitts der Donau im Vergleich zur Scatter Analyse angewendet. Dafür wurden 13 Eingangsparameter als unsicher deklariert und mit entsprechenden Gauß oder Doppel-Gauß-Verteilungen belegt. Um eine repräsentative Aussage zu erhalten und trotzdem eine mögliche Rechenzeit für die Monte-Carlo-CL Methode zu garantieren, wurde eine synthetische Ganglinie mit 2 gleichen Hochwässern berechnet. Eine Simulation benötigte auf einem Parallelrechner etwa 45 min. Für die Scatter-Analyse waren 27 Simulationen nötig, für die Monte-Carlo CL-Methode wurden 1000 Simulationen durchgeführt. Mit Hilfe der Scatter Analyse können die unsicheren Eingangsparameter sehr schnell entsprechend ihrer Sensitivität sortiert werden. Eine genaue Ausweisung der Vertrauensintervalle ist aufgrund des nichtlinearen Verhaltens der Morphologie an vielen Stellen nur mit der Monte Carlo CL Methode möglich. Bild 1 zeigt jeweils ein Teil des 95%-Vertrauensintervalls, das ausgehend vom Mittelwert einmal abgezogen (min) bzw. addiert (max) werden muss.

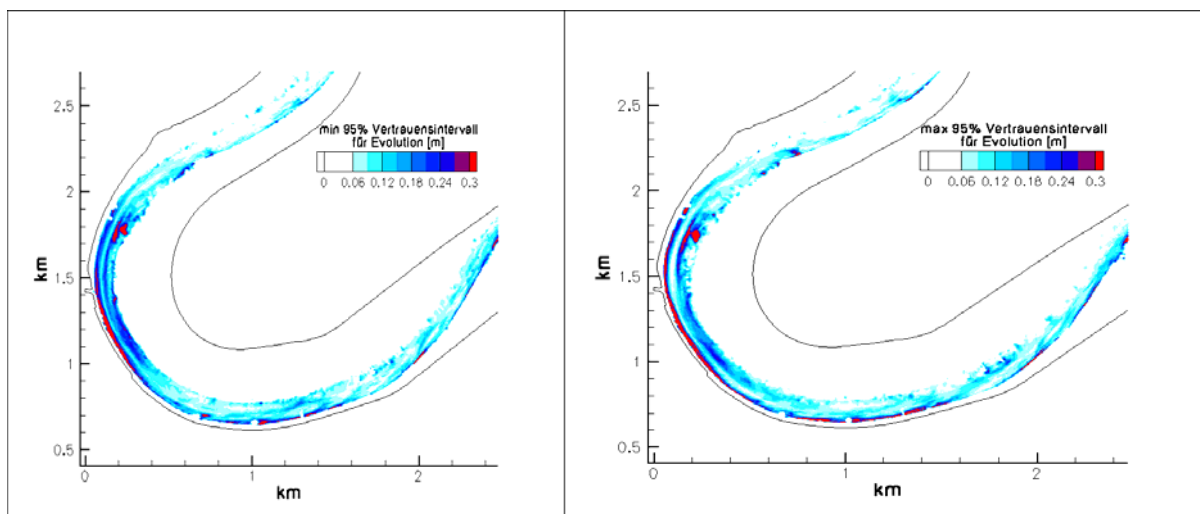


Bild 1: 95%-Vertrauensintervall der Evolution, das ausgehend vom Mittelwert einmal abgezogen (min) bzw. addiert (max) werden muss.

An der 2 m Systemrinne mit Einengung (Einbauten: 15,5m Länge, 1,0m Breite) wurde nach Abschluss einer Versuchsreihe mit Kiessohle eine neue Versuchsreihe mit Sandmaterial durchgeführt [2]. Die dabei erhobenen Daten wurden verschiedenen Universitäten zu Validierungszwecken zur Verfügung gestellt. Bild 2 zeigt die Sohlagen von drei Versuchen mit identischen Randbedingungen nach 2 Stunden Simulationszeit. In der Einengung bilden sich Erosions- und Anlandungszonen, die als Transportkörper bzw. Dünen nach unterstrom wandern. Die Variabilität der Sohlagen nach zwei Stunden Versuchslaufzeit ist recht gering.

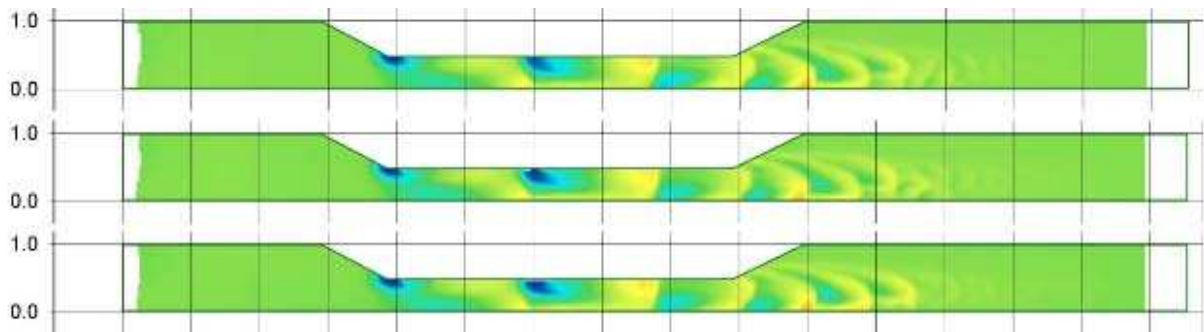


Bild 2: Sohlagen (blau: Erosion, gelb/rot: Anlandung) nach 2 h Versuchslaufzeit für drei Versuche mit identischen Randbedingungen mit Sand in der 2m-Rinne mit Einengung

Im Rahmen einer Diplomarbeit [1] wurden die Daten von der Versuchsreihe dieser Rinne mit Kiesmaterial zur Validierung der tiefengemittelten morphodynamischen Verfahren Telemac2D/Sisyphe<sup>1</sup> und FLUMEN<sup>2</sup> verwendet. Es wurden verschiedene Parameter variiert und auf ihre Sensitivität hin untersucht. Bild 3 zeigt, dass nach entsprechender Kalibrierung das Programm Telemac2D/Sisyphe in der Lage ist, die Erosion in der Einschnürung, sowie die in der Aufweitung entstehenden Düne recht gut abzubilden. Die Abbildungsgüte eines zweidimensionalen Verfahrens ist für dieses Rinnenbeispiel begrenzt, da durch die Einschnürung eine stark turbulente und durch das kleine Breiten-Tiefen-Verhältnis ausgeprägte dreidimensionale Strömung entsteht.

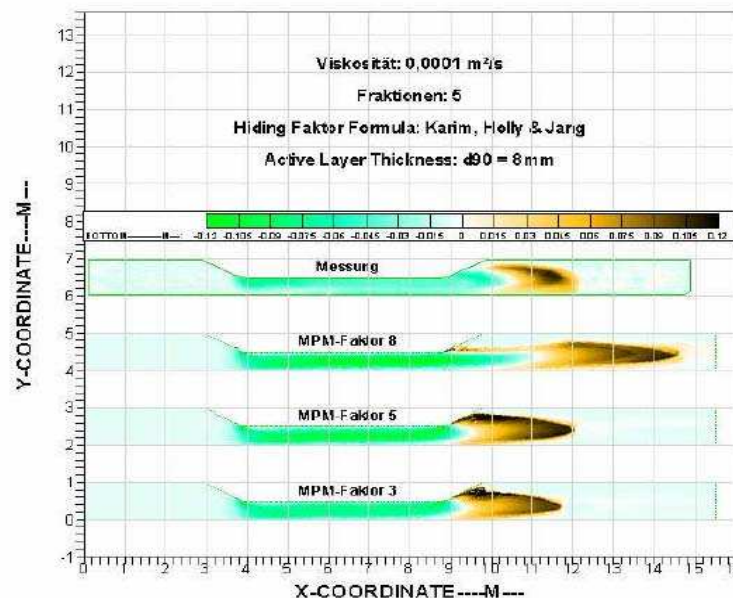


Bild 3: Vergleich der Sohlhöhenänderung zwischen Messung und morphodynamischer Berechnung des Programms Telemac2D/Sisyphe mit Variation des Vorfaktors der Geschiebetransportformel von Meyer-Peter & Müller (aus [1])

<sup>1</sup> Programm der Electricité de France

<sup>2</sup> Programm des Institute for Water and Atmospheric Research, Neuseeland

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Entsprechend der genannten Untersuchungsschwerpunkte werden die folgenden Arbeitsschritte verfolgt:

- Erstellung von Validierungsdatensätzen in den Systemrinnen für zentrale flussbauliche Phänomene (Transportkörperevolution, Wirkung von Strombauwerken und Gewässerberandung auf die Flussole)
- Anwendung der entwickelten Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse im Rahmen aktueller Projekte
- Weiterentwicklung der Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse
- Validierung der bestehenden FT-Modelle anhand von Validierungsdatensätzen
- Behebung der bei der Validierung aufgetretenen Mängel in den FT-Modellen

Das Vorhaben wird in 2012 abgeschlossen.

#### 5 Literatur

- [1] Grafmüller, Thomas (2009): Sensitivitätsanalysen für die morphodynamischen Verfahren TELEMAC2D / SISYPHE und FLUMEN anhand morphologischer Versuche in einer Laborrinne, Diplomarbeit Universität Karlsruhe
- [2] Hüsener, Thorsten (2009): Morphologische Versuche an einer Rinne mit Einschnürung - aktueller Stand, Vortrag beim Gesinus-Treffen in Braunschweig, 16.-18. Juli 2009
- [3] Nikitina, Lialia, Clees, Tanja (2009): Fallstudie für die Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Methode MC-CL, Fraunhofer Institut Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI, Abschlussbericht zum Arbeitspaket 2.1
- [4] Nikitina, Lialia, Clees, Tanja (2009): Entwicklung der Softwaretools CLcomp und DoE, Fraunhofer Institut Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI, Abschlussbericht zum Arbeitspaket 2.2

## **KLIWAS-Projekt 4.03: Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes**

**Netzplan-Nr.:** A39530170001

**Projektleiter:** Dr.-Ing. M. Schröder; Dipl.-Ing. S. Wurms (Bearbeiter), Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat Flusssysteme I (W 1)

**E-Mail:** michael.schroeder@baw.de, sven.wurms@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

Als eine Auswirkung des Klimawandels wird befürchtet, dass die Häufigkeit und Dauer extremer Abflussverhältnisse in den deutschen Flüssen zunehmen könnte. Betroffen wären hiervon in besonderem Maße die frei fließenden Binnenwasserstraßen Rhein, Donau, Elbe und Oder. Während die Schifffahrt erst bei sehr extremen Hochwasserabflüssen über dem sogenannten *Höchsten Schiffbaren Wasserstand* (HSW Marke II) eingestellt wird, ist bei extremen Niedrigwasserabflüssen eine zunehmende Beeinträchtigung festzustellen, wie dies beispielsweise während des extremen 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 Breiteneinschränkungen in der Fahrrinne, die bei Wasserständen unter dem heutigen Niedrigwasserausbau durch Untiefen im Randbereich der Fahrrinne verursacht werden. Betroffen hiervon wäre vor allem die Sicherheit und Leichtigkeit, mit der die Schifffahrt dann noch in Engpassstellen zu navigieren vermag.

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

Zur Identifikation von Anpassungsmaßnahmen des Verkehrsweges Wasserstraße 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 – St. Goar (Rhein-km 493,0 – 557,5) durchgeführt.

Zum Einsatz hierfür kommt ein hochaufgelöstes, 2D-hydrodynamisch-numerisches Modell, durch welches sämtliche hydraulisch relevanten Strukturen wie Buhnen oder Parallelwerke abgebildet werden können. Die in der BAW eingesetzten hydro- und morphodynamischen Berechnungsverfahren realisieren den heutigen Stand von Wissenschaft und Technik in den Fachgebieten Hydro- und Morphodynamik.

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 Diskretisierung 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 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.



### 1.3 Untersuchungsziel

Ziel dieses Projektes ist es, mögliche wasserbauliche und wasserwirtschaftliche Maßnahme zu identifizieren und zu bewerten, mit denen in Niedrigwasserperioden Mindestfließtiefen in frei fließenden Wasserstraßen über längere Zeiträume als heute garantiert werden können.

Im Rahmen dieses Projektes erfolgt zunächst eine Analyse des heutigen Gewässerzustands, um diejenigen Niedrigwasserstände zu bestimmen, ab denen die Navigation der verschiedenen Schiffstypen behindert und schließlich sukzessive eingestellt werden muss. Auf dieser Untersuchung der Anfälligkeit aufbauend werden die Schwachstellen des Systems Wasserstraße identifiziert, erforderliche Ausbaumaßnahmen konzipiert und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet. Abschließend ist der Unterhaltungs- und Regelungsaufwand hinsichtlich des Gewinns für die Schifffahrt im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse zu ermitteln.

### 2 Untersuchungsmethoden

Sämtliche Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes werden zunächst exemplarisch für die Pilotstrecke Ober-/Mittelrhein von Mainz bis St. Goar (Rhein-km 493,0 – 557,5) durchgeführt. Ähnlich detaillierte Untersuchungen für andere Streckenabschnitte bzw. Wasserstraßen und die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse müssen in einem zweiten Schritt im Anschluss an die Laufzeit dieses Projektes erfolgen. Das Untersuchungsprogramm gliedert sich grundsätzlich in 2 Abschnitte:

1. die Analyse des heutigen Ausbauszustandes der Wasserstraßen und
2. die Planung und Bewertung verschiedener Optionen eines Niedrigwasserausbaus.

Grundlage für eine qualitative und quantitative Analyse, Planung und Bewertung der Wasserstraßen ist die hydrodynamische und morphodynamische Modellierung der Strömungs- und Transportprozesse, deren Komplexität eine mehrdimensionale mathematisch-numerische Modellierung erfordert. Zum Einsatz kommen hier die in der BAW vorhandenen mehrdimensionalen hydro- und morphodynamischen Berechnungsverfahren einschließlich eines Moduls für Baggerungen und Geschiebezugaben. Eine Anpassung und Erweiterung der Berechnungsverfahren wird nach Bedarf in Eigenleistung oder in Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern der BAW realisiert.

Mit Hilfe des 2D-hydrodynamisch-numerischen Simulationsverfahrens TELEMAC-2D erfolgt zunächst die Analyse des heutigen Niedrigwasserausbaus. Hierzu werden modelltechnische Untersuchungen für den Streckenabschnitt Ober-/ Mittelrhein von Mainz bis St. Goar (Rhein-km 493,0 – 557,5) durchgeführt. Da derzeit noch keine belastbaren Abflussprojektionen für den betrachteten Zeitraum bis 2100 vorliegen, erfolgt eine hydrodynamische Untersuchung für unterschiedliche Niedrigwasserzustände, so z.B. GIQ - 5% bis GIQ - 25%. Sobald die Bandbreite möglicher Abflussänderungen bekannt sein wird, lassen sich die untersuchten Zustände darin einordnen.

Der heutige Niedrigwasserausbau stellt keinen statischen, sich selbst erhaltenden Gewässerzustand dar, sondern erfordert einen kontinuierlichen Unterhaltungsaufwand durch Baggerungen und Geschiebezugaben. Im Rahmen von morphodynamischen Modellrechnungen mit SISYPHE soll dieser Unterhaltungsaufwand zunächst für ein Null-Szenario ohne Klimaänderungen abgeschätzt werden. Für diese Langzeitsimulation werden als Eingangsdaten Ganglinien der Hauptpegel und bedeutender seitlicher Zuflüsse benötigt, die den „heutigen“ klimatischen Bedingungen entsprechen. Die Simulationsergebnisse liefern den Unterhaltungsaufwand in jährlichen Bagger- und Geschiebezugabemengen, die erforderlich sind, um den Status quo der Wasserstraße aufrecht zu erhalten.

Auf der Grundlage der hydro- und morphodynamischen Streckenanalyse werden die Streckenabschnitte identifiziert, die bei den einzelnen Niedrigwasserszenarien zu Engpassstellen für die Schifffahrt werden, und die zur Herstellung einer durchgängigen Fahrrinne durch Baggerungen unterhalten werden müssen. Eine Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit des Transportträgers Binnenschifffahrt auch bei extremen Niedrigwasserabflüssen erhalten zu können ist der Ausbau der Wasserstraßen in Form einer durchgehenden, gegebenenfalls breitenreduzierten Niedrigwasserfahrerinne, welche vorhandene Übertiefen ausnutzt. Dieses Konzept, das mit dem Schlagwort „Fahrerinne in der Fahrerinne“ belegt

wurde, erfordert zahlreiche begleitende stationäre und auch temporäre Regelungsmaßnahmen, die dazu geeignet sind, den Unterhaltungsaufwand für den Niedrigwasserausbau in technisch realisierbaren Grenzen zu halten. (Die Lage der „Fahrrinne in der Fahrrinne“ wird im Rahmen des KLIWAS-Projekts 4.04 „Ermittlung von Fahrrinnenmindestbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt“ ermittelt. Nach Implementierung der „Fahrrinne in der Fahrrinne“ im hydrodynamischen Modell erfolgt eine Neubestimmung der Fahrrinnenlage unter Verwendung der auf Grund des Einbaus veränderten Strömungsgeschwindigkeiten).

Mit dieser ersten bautechnischen Variante werden hydro- und morphodynamische Berechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Modelluntersuchungen dienen zum einen dazu, die Unschädlichkeit der Baumaßnahmen hinsichtlich eines Wasserspiegelverfalls im Bereich von Niedrig- bis Mittelwasserabfluss sowie Verlandungs- oder Erosionsprobleme zu erkennen. Dann sind zum anderen die Stromabschnitte zu identifizieren, in welchen weitere Regelungsmaßnahmen sinnvoll bzw. notwendig sind, um negative Auswirkungen der Niedrigwasserfahrrinnen zu beseitigen und deren Unterhaltungsaufwand zu minimieren. Mögliche Regelungsmaßnahmen, die aus heutiger Sicht geeignet sein könnten, die gestellten Anforderungen zu erfüllen, sind:

- die üblichen Regelungsbauwerke Buhnen und Parallelwerke sowie
- temporäre Buhnen und Schwellen bzw. Sohlgleiten.

Im Zuge der Konzeption von Regelungsbauwerken entstehen neue bautechnische Varianten, die im Rahmen von weiteren hydro- und morphodynamischen Modellrechnungen hinsichtlich ihrer Eignung zu bewerten sind. Für die morphodynamischen Langzeitsimulationen sind nun verschiedene Klimaszenarien, beginnend mit dem Null-Szenario durchzuführen.

Im Rahmen des Projekts erfolgt eine rein technische Betrachtung der potenziellen Ausbaumöglichkeiten. Weitere, im Kontext mit der „Fahrrinne in der Fahrrinne“ auftretende Fragestellungen wie z.B. verkehrsrechtliche Belange werden in diesem Rahmen nicht aufgegriffen.

### 3 Ergebnisse

Die Untersuchung der hydraulischen Größen innerhalb der Fahrrinne bei bestehenden Niedrigwasserbedingungen ( $GIQ_{2002}$ ) sowie reduzierten Niedrigwasserabflüssen zeigt, dass im Modellbereich ein erhebliches Anwachsen von geometrischen Engpassstellen im Falle sinkender Niedrigwasserabflüsse zu erwarten ist. Insbesondere im Bereich von Rhein-km 508,0 – 557,0, in welchem die geringste im frei fließenden Bereich des Rheins freigegebene Fahrrinntiefe von 1,90 m unter  $GIW_{2002}$  vorliegt, treten beim heutigen Ausbau unter reduzierten Niedrigwasserabflüssen eine Vielzahl neuer Fehlstellen zu tage. Bild 1 sind die Fehlvolumina innerhalb der Fahrrinne je laufendem Kilometer zu entnehmen, welche bei  $GIQ_{2002}$  ( $Q_{kaub} = 750 \text{ m}^3/\text{s}$ ) sowie schrittweise reduziertem  $GIQ_{2002}$  durch zu geringe Wassertiefen im Fahrrinnenbereich auftreten. Die große Anzahl der zu erwartenden Fehlstellen unterstreicht das Konzept der „Fahrrinne in der Fahrrinne“, da eine separate Entschärfung der Fehlstellen bei reduzierten Niedrigwasserabflüssen durch einzelne wasserbauliche Maßnahmen einen erheblichen Aufwand bedeuten würde.

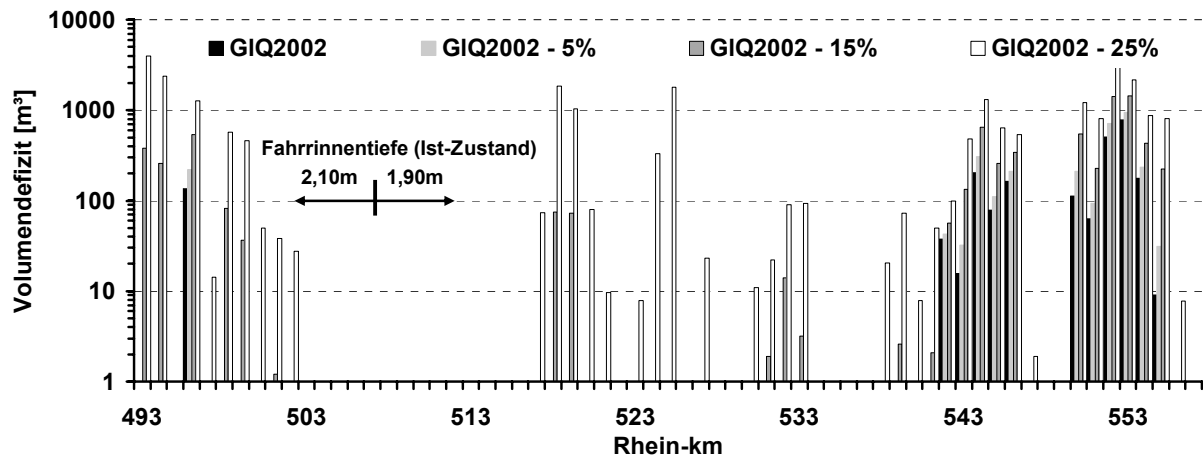


Bild 1: Fehlvolumina im Fahrrinnenbereich je laufendem Flusskilometer (Rhein-km 493,0 – 557,5) in Abhängigkeit der Größe des Niedrigwasserabflusses

Die modellhafte Implementierung der Fahrrinne in der Fahrrinne erfolgt für die einzelnen Niedrigwasserabflüsse  $GIQ_{2002}$  bis  $GIQ_{2002} - 25\%$  jeweils mit einer Solltiefe von 2,10 m unter dem korrespondierenden Wasserspiegel. Die anschließenden hydrodynamischen Untersuchungen belegen die Wirksamkeit der Maßnahme, durch welche im gesamten Unterhaltungsbereich der „Fahrrinne in der Fahrrinne“ die Solltiefe von 2,10 m bei den Niedrigwasserabflüssen  $GIQ_{2002}$  bis  $GIQ_{2002} - 25\%$  erreicht werden kann.

Je nach Einbauniveau der „Fahrrinne in der Fahrrinne“ stellt diese Maßnahme einen nicht unerheblichen Eingriff in das System Wasserstraße dar, dessen Auswirkungen auf die Lage des Wasserspiegels es ebenso zu bewerten gilt wie die Änderungen der Morphodynamik als Folge veränderter Fließgeschwindigkeiten. Bild 2 zeigt exemplarisch, dass im Extremfall des reduzierten Niedrigwasserabflusses  $GIQ_{2002} - 25\%$  und dem Einbau der „Fahrrinne in der Fahrrinne“ auf eine Solltiefe von 2,10 m unter den Wasserspiegel, welcher bei  $GIQ_{2002} - 25\%$  auftritt, ein maximaler Absink von 0,02 m zu erwarten ist. Hierbei handelt es sich jedoch um den Abfluss, welcher im langjährigen Mittel lediglich 20 Tage im Jahr unterschritten wird. Im Fall des langjährigen mittleren Abflusses MQ ( $Q_{Kaub} = 1660 \text{ m}^3/\text{s}$ ) weist der Wasserspiegel bei genanntem Einbauniveau lediglich einen maximalen Absink von 0,01 m auf.

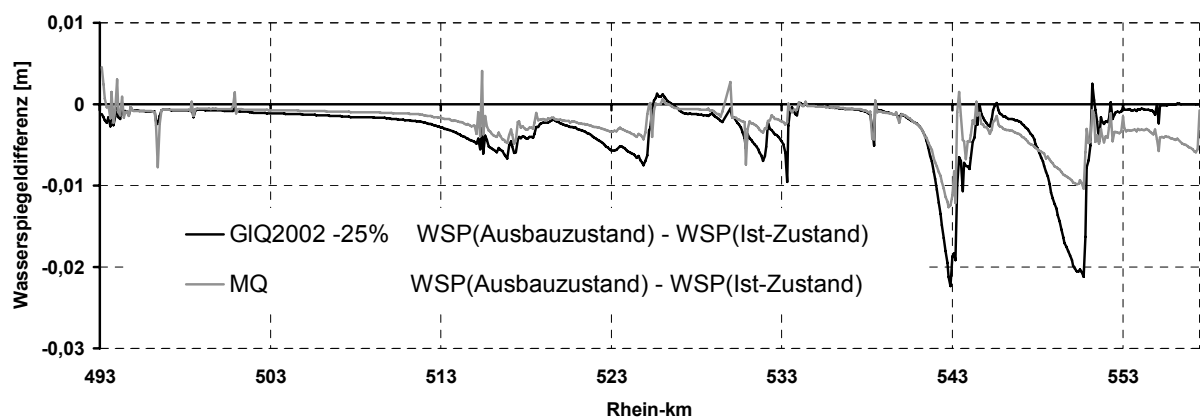


Bild 2: Änderungen der Wasserspiegellage nach Implementierung der „Fahrrinne in der Fahrrinne“ mit einer Solltiefe von 2,10 m unter dem bei  $GIQ_{2002} - 25\%$  auftretenden Wasserspiegel bei  $GIQ_{2002} - 25\%$  und MQ

Ein Vergleich der Fließgeschwindigkeiten zwischen heutigem Ausbauzustand und nach Implementierung der „Fahrrinne in der Fahrrinne“ auf eine Solltiefe von 2,10 m unter dem Wasserspiegel, welcher bei  $GIQ_{2002} - 25\%$  auftritt zeigt, dass im Bereich von Mittelwasserabflüssen Änderungen bis ca. 0,5

m/s auftreten. Um eine Störung des dynamischen Sohlgleichgewichts zu verhindern, werden in folgenden Untersuchungen Regelungsmaßnahmen erarbeitet, welche diesen Veränderungen entgegenwirken sollen.

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

Entsprechend den Untersuchungsschwerpunkten werden bis Ende des Jahres 2013 die folgenden Arbeiten durchgeführt:

- Untersuchung weiterer baulicher Maßnahmen inkl. der „Fahrrinne in der Fahrrinne“ zur Gewährleistung von Mindestfließtiefen bei reduzierten Niedrigwasserabflüssen
- Identifikation unterstützender baulicher Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des Sohlgleichgewichts nach Einbau der „Fahrrinne in der Fahrrinne“ auf Basis hydrodynamischer Untersuchungen
- Aufbau und Kalibrierung eines 2D-morphodynamischen Modells von Rhein-km 493,0 – 557,5, welches zur Abschätzung des Unterhaltungsaufwandes im Ist- sowie zur Ermittlung von Unterhaltungsstrategien im Planungszustand dient
- Bewertung der einzelnen Ausbauvarianten
- Qualitative Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf andere Abschnitte der Wasserstraße

## **Hydraulische Wirkung von Stromregelungsbauwerken**

**Netzplan-Nr.:** A39530210077

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. B. Hentschel, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat Flusssysteme II (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, insbesondere ihre Auswirkungen auf die Schifffahrt sowie die Morphologie der Flusssohle und der Buhnenfelder, sind für die heutigen hohen Anforderungen an die Prognosefähigkeit von Modellen unzureichend. Insbesondere die Modellierung der Morphologie der Flusssohle ist aufgrund des noch lückenhaften Prozessverständnisses derzeit sowohl in physikalischen als auch in numerischen Modellen mit Unsicherheiten verbunden.

Ziel ist es, geeignete Modellierungsmethoden zu entwickeln bzw. weiter zu entwickeln, um die Prognosefähigkeit unterschiedlicher Modellverfahren hinsichtlich der Auswirkungen von Strombauwerken auf die Morphologie der Flusssohle und des Uferbereiches zu verbessern. Darüber hinaus sollen aber auch konkrete hydraulische Phänomene allgemeingültig untersucht und einer Modellierbarkeit zugänglich gemacht werden.

Im Jahr 2007 wurde eine Literaturrecherche zum Geschiebetransport und zur Morphologie in alluvialen Gewässern beim Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig von der BAW beauftragt. Diese Studie fasst den für die derzeitigen Fragestellungen relevanten aktuellen Stand des Wissens, insbesondere für physikalische Geschiebetransportmodellierungen, zusammen. Darauf aufbauend wurde in den Jahren 2008 und 2009 eine flussbauliche Systemrinne für Grundsatzuntersuchungen aufgebaut und in Betrieb genommen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Eine genaue und detaillierte Kenntnis des Bewegungsmusters von Sohlformen ist für unterschiedliche Fragestellungen der WSV von hoher Bedeutung. Dazu gehören neben der Verbesserung der Prognosewerkzeuge in der BAW (hydraulische und numerische Modelle) auch die Optimierung von Peil- und Unterhaltungsarbeiten an den frei fließenden Bundeswasserstraßen.

Im Rahmen der wasserwirtschaftlichen Unterhaltung an Bundeswasserstraßen ist auch angedacht, gezielt Stromregelungsbauwerke im Rahmen der Unterhaltung 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 quantifizieren zu können.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

An der BAW steht mit der dreidimensionalen Photogrammetrie ein einzigartiges System zur Messung der Sohlformen zur Verfügung, mit welchem die relevanten statistischen Parameter eines Dünenfeldes ermittelt werden können. Das System bietet die Möglichkeit, während des Betriebs des Modells repräsentative Momentaufnahmen der Gewässersohle in kurzen Zeitabständen zu machen. Durch die Aufnahme und Analyse von Bildfolgen lassen sich die Fortschrittsgeschwindigkeiten und charakteristischen Formen der Oberflächenstrukturen und Volumenänderungen bestimmen.

Ziel ist es, systematisch die Zusammenhänge zwischen Stromregelungsvarianten, instationären Abflussereignissen und der Sohlform in alluvialen frei fließenden Gewässern näher zu analysieren um sie damit für numerische und physikalische Modellierungen prognostizierbar zu machen. Daneben

sollen durch vergleichende Analysen von Naturuntersuchungen die Maßstabsgesetze für die Modellierung von Sohlstrukturen in physikalischen Modellen weiterentwickelt werden. Derzeit gibt es keine publizierten Ansätze für berechenbare Maßstabsbeziehungen, um Sohlformen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Abflüssen und Kornverteilungen für physikalische Modelle naturähnlich abbilden zu können.

An einer im Jahr 2009 in betrieb genommenen Versuchsrinne sind Untersuchungen zum Geschiebetransport geplant. Das Untersuchungsprogramm sieht Versuche zur Auswirkung von teilbefestigten Sohlen in geraden Gewässerabschnitten und zur Auswirkung von im Rahmen der Unterhaltung modifizierten Strombauwerken auf den Geschiebetransport in der Strommitte vor.

## 2 Untersuchungsmethoden

Im Jahr 2009 wurde eine flussbauliche Systemrinne zur Untersuchung morphologischer Fragestellungen in Betrieb genommen.

Bild 1 zeigt Sohlstrukturen in der Rinne während der hydraulischen und morphologischen Kalibrierung bei einem Abfluss von 185 l/s. Das obere Bild (ES) zeigt die eingeebnete Sohle vor dem Versuchslauf. Die angegebene Zeit rechts zeigt die jeweils abgelaufene Modellzeit.

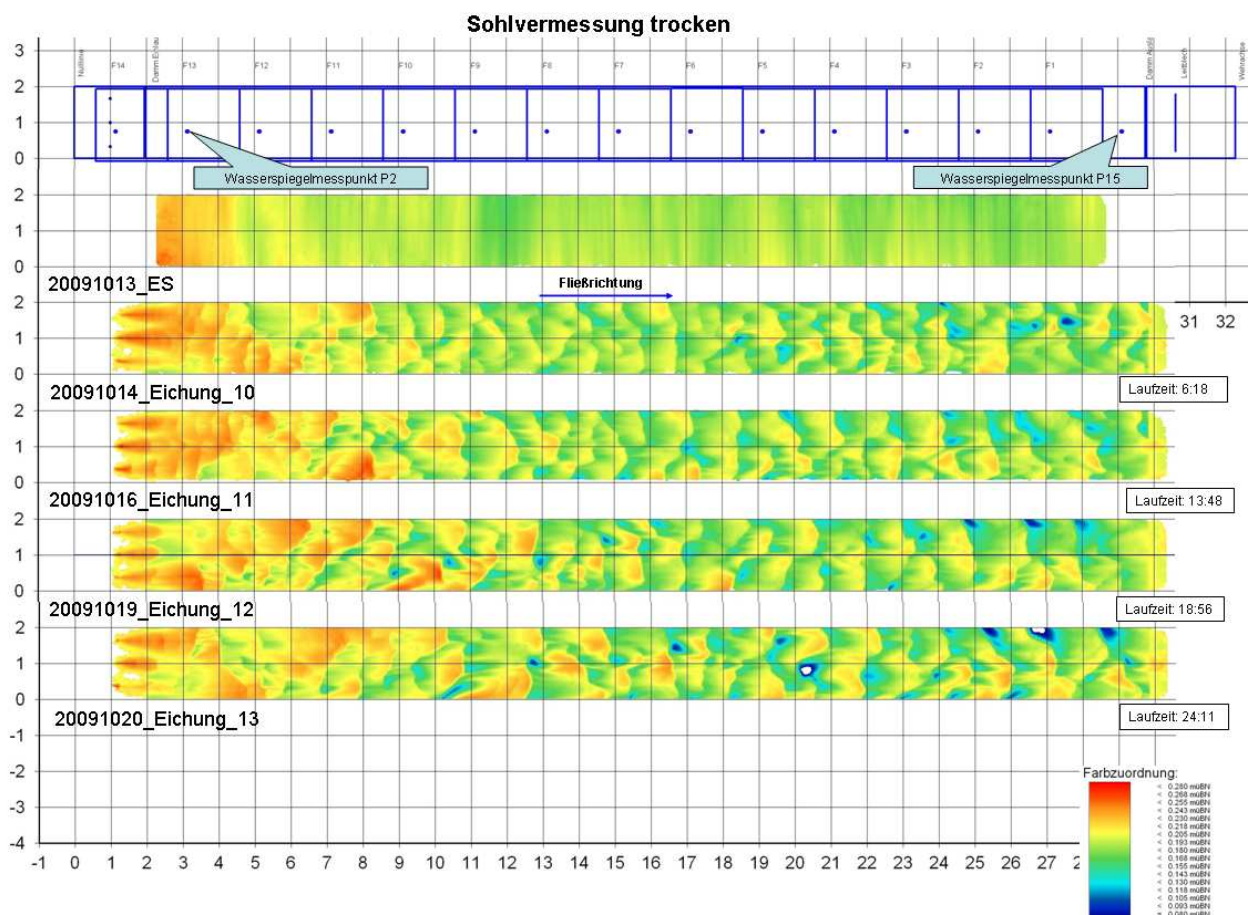


Bild 1: Sohlvermessungen in der flussbaulichen Systemrinne (ohne Einbauten)

Bild 2 zeigt eine Sohlvermessung während eines Versuches durch das fließende Wasser bei dem gleichen Abfluss. Diese Modelldaten werden einer räumlichen statistischen Analyse unterzogen und bieten die Basis für Vergleichsanalysen mit den geplanten Geometrievarianten in der Systemrinne.

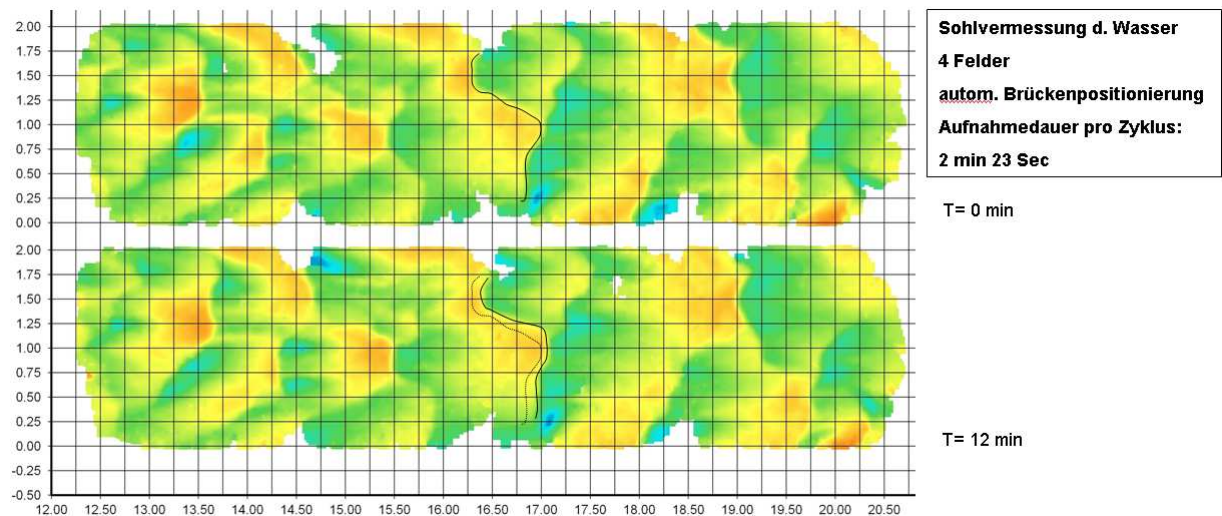


Bild 2: Fortschritt einer Dünenfront

Die statistischen Parameter, welche aus den Sohlaufnahmen gewonnen werden und zuerst auf die Mittelwerte und die Standardabweichung beschränkt sein sollten, werden auf ihre Abhängigkeit von den Durchflüssen bzw. von den Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten untersucht. Durch die Möglichkeit der Unterwassermessung kann aus aufeinanderfolgenden Aufnahmen die Fortschrittsgeschwindigkeit der Sohlstrukturen über Kreuzkorrelation ermittelt werden und aus Differenzberechnungen lassen sich Volumenbilanzen bilden. Aus diesen Daten lässt sich ein Transport berechnen, welcher mit der am Modellende gemessenen Menge des ausgetragenen Geschiebes verglichen werden kann.

Die Untersuchungen werden begleitet bzw. ergänzt durch numerische mehrdimensionale hydraulische und morphologische Modellierungen.

### 3 Ergebnisse

Die oben genannte und im Jahr 2007 erstellte Literaturstudie stellt die Grundlage für das weitere Vorgehen dar. Die morphologischen Daten des in der BAW vorhandenen physikalischen Modells der Oder bei Hohenwutzen wurden hinsichtlich der Bewegung und Muster von Dünen an der Flusssohle weiter analysiert. Ergebnisse wurden veröffentlicht (s. Literatur)

Eine neue Versuchsrinne ist 2009 in Betrieb genommen worden und mit dem Untersuchungsprogramm wurde begonnen. Die Untersuchungen zum Ausgangszustand (Rinne ohne Einbauten), sind weitgehend abgeschlossen und im 2. Quartal 2010 wird mit den Untersuchungen zu einer teilbefestigten Sohle begonnen. Ergebnisse von diesen Untersuchungen liegen noch nicht vor.

Die in Zusammenarbeit mit der BfG und Dritten durchgeführten Untersuchungen an Versuchsbuhnen an der Elbe bei Schönberg wurden fortgesetzt. Im März 2010 findet ein gemeinsames BfG / BAW Kolloquium in Magdeburg statt, bei dem die Ergebnisse interdisziplinär vorgestellt werden sollen. Die Ergebnisse werden in einer gemeinsamen Schrift veröffentlicht. Die Naturuntersuchungen zu den hier betrachteten alternativen Strombauwerken (Knick- und Kerbbuhnen) wurden auch im Jahr 2009 fortgeführt. Für die kommenden Jahre ist ein reduziertes Monitoring der Untersuchungsstrecke vorgesehen.

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

2010: Fortführung der Untersuchungen an der flussbaulichen Systemrinne zum räumlichen und instationären Bewegungsverhalten von Sohlformen über teilbefestigten Sohlen.

Durchführung einer Messkampagne an der Versuchsstrecke an der Elbe bei Schönberg (Knick- und Kerbbuhnen). Bei einem interdisziplinären Kolloquium zusammen mit der BfG, Hochschulen und Ingenieurbüros sollen im März 2010 die Ergebnisse der Untersuchungen an alternativen Strombauwerken (Knickbuhnen und Kerbbuhnen an der Elbe) der WSV und der Fachöffentlichkeit vorgestellt werden. Die Ergebnisse sollen in einer gemeinsamen Publikation veröffentlicht werden.

2011: Fortführung der Untersuchungen an der flussbaulichen Systemrinne (Veränderung des Geschiebetransportes infolge Umgestaltung von Stromregelungsbauwerken im Rahmen der wasserwirtschaftlichen Unterhaltung).

Fertigstellung der Interdisziplinären Publikation mit der BfG und Dritten zu alternativen Strombauwerken. Fortsetzung der Naturuntersuchungen und –analysen.



## **Optimierungsverfahren für die Parametrisierung von Reglern der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR)**

**Netzplan-Nr.:** A39530310105

**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**

Zahlreiche Flüsse in Deutschland sind zur Verbesserung der Schifffahrt und zur Energieerzeugung staugeregelt. Die unterschiedliche Nutzung muss gewährleisten, dass ein planfestgestelltes Stauziel innerhalb einer vorgegebenen Toleranz eingehalten wird. In diesem Themenkomplex ist eine Aufgabe der BAW, die Regelung für die Staufstufen zu konzipieren, zu parametrisieren und die Funktionsweise der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung nachzuweisen. Das erfolgt in der BAW mit Hilfe einer detaillierten Simulation von Bauwerk und Flussstrecke (HN-Modell), die über die Leittechnik miteinander verknüpft werden. Da mit diesem Verfahren alle relevanten Prozesse möglichst wirklichkeitsgetreu wiedergegeben werden, ist diese Untersuchungsmethode entsprechend zeitaufwändig. Im Gegensatz zu dieser aufwändigen Vorgehensweise existieren einfache Verfahren, wie z.B. der Ansatz nach [1], der die Regelungsparameter mit systemtheoretischen Methoden bestimmt. Nachteilig daran ist die stark vereinfachte Beschreibung der Prozesse, weswegen dieser Ansatz nur zur „groben Vor-dimensionierung“ geeignet ist. Zwischen diesen beiden Vorgehensweisen können Zwischenstufen entwickelt bzw. vorhandene genutzt werden, die einerseits die Realität hinreichend genau beschreiben und andererseits den Aufwand für die Modellierung so gering als möglich halten.

Die OW/Q-Regelung ist für die Stauregelung der Stand der Technik. Aus der Regelabweichung (Oberwasserstand – Stauziel) wird über einen Proportional- und Integralalgorithmus (PI-Regler) der OW-Anteil der OW/Q-Regelung ermittelt. Dieser OW-Anteil wird ergänzt durch den Steuerungsanteil aus der Störgrößenaufschaltung, dem Q-Anteil der OW/Q-Regelung. Nach dem Stand von Wissenschaft und Technik existieren weitere Ansätze (vgl. Punkt 3), mit denen die Stauregelung weiter verbessert werden kann. Für diese Ansätze gilt es zu klären, welche Vorteile der Schifffahrt aus ihrer Anwendung entstehen und mit welchem Aufwand deren Umsetzung verbunden ist.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Jede Regelung beschreibt ein rückgekoppeltes Systemverhalten, bei der durch Vorgabe der Stellgrößen an den Regelorganen, üblicherweise Kraftwerk und Wehr, der Wasserstand der Regelstrecke geführt wird. Bei fehlerhaft ausgelegtem Regelungssystem bzw. Regelungsparametern können instabile Zustände in der Flussstauhaltung hervorgerufen werden, was sich in aufklingenden Wasserstandsschwingungen zeigt. Daher können die Regelparameter nicht im Betrieb bestimmt werden, diese müssen vorab bereitgestellt werden. Die Auswirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftungsstrategien kann vorab durch die BAW analysiert werden, diese müssen nicht durch aufwändige und eventuell die Schifffahrt behindernde Naturversuche ermittelt werden. Die BAW ist diesbezüglich zurzeit an Stauhaltungen der Mosel, Saar, Neckar, Ruhr, Werra und Fulda tätig.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel des FuE-Vorhabens ist es, eine Methode zur mehrstufigen systematischen Reglerentwicklung und –parametrisierung zu erhalten. Daraus ergeben sich im Wesentlichen 3 Untersuchungsziele:

- Untersuchungsziel 1: Vereinfachung des Simulationsverfahrens der BAW
- Untersuchungsziel 2: Analyse / Weiterentwicklung bestehender Berechnungsansätze
- Untersuchungsziel 3: Bewertung der Ziele hinsichtlich einer automatisierten Parameteroptimierung

## 2 Untersuchungsmethoden

Das Forschungsvorhaben stützt sich auf folgende Methoden:

- Modelluntersuchungen: Sensitivitätsanalyse der Regelparameter anhand von Simulationsrechnungen (Untersuchungsziel 1).
- Literaturstudie: Systematische Auswertung der gängigen Fachliteratur nach weiteren Modellan-sätzen (Untersuchungsziele 2 und 3)
- Mathematisch-analytische Methoden:
  - Analyse der Messwertfilterung mit den Methoden der Signaltheorie (Untersuchungsziel 1)
  - Analysemethoden der klassischen Regelungstechnik zu LZI-Systemen (Untersuchungsziel 2)
- Datenauswertung: Anhand von „Naturdaten“ der automatisierten Moselstau-stufen werden die Ansätze zur Reglerparametrisierung überprüft und statistisch interpretiert (Untersuchungsziel 1 und 2)
- Optimierungsverfahren: Suche nach Parametern mit optimaler Regelungsgüte (Untersuchungsziel 3)

## 3 Ergebnisse

Nachfolgend werden Ergebnisse wiedergegeben, die einerseits an der Vereinfachung der Berechnungsmodelle bzw. der Portierung in eine SPS (Untersuchungsziel 1) und der Weiterentwicklung der bestehenden Berechnungsverfahren (Untersuchungsziel 2) ansetzen.

Die Algorithmen der Regler und deren Parameter werden in der BAW modellbasiert abgeleitet. Die Algorithmen wurden anfangs in der Programmiersprache C, später in C++ entwickelt und getestet. Seit 2004 wird die Simulations- und Entwicklungsumgebung MATLAB & SIMULINK von `The MathWorks` eingesetzt, die eine hierarchische Modellierung mit Hilfe grafischer Blöcke ermöglicht. Die abgeleiteten und parametrisierten Algorithmen, beispielsweise einer OW/Q-Regelung, müssen in der Praxis an herstellereinspezifische Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) übergeben und angepasst werden. Bisher wurde dies über den Zwischenschritt eines Metacodes gelöst, der ein zeitaufwendiges und fehleranfälliges Umschreiben bestehender Algorithmen bedeutet. Nach der Übergabe an die ausführende Automatisierungsfirma muss der Metacode interpretiert und in die dortige Programmierumgebung eingebunden werden. Der implementierte Reglercode ist später vom Entwickler schwer lesbar und erfordert zudem eine Validierung anhand von Simulationsrechnungen. Zur Vereinfachung dieses zeitintensiven Arbeitsschrittes wird in der BAW untersucht, wie die entwickelten Regelungskonzepte ohne den Zwischenschritt des Metacodes direkt in die SPS übertragen werden können (automatische Code-Generierung). Dieser Entwicklungsprozess wird als Model-Based Design bezeichnet. Das zu steuernde physikalische System kann dabei zunächst mathematisch modelliert und alle benötigte Software entwickelt werden. Danach kann das Verhalten in Modell und Realität getestet werden.

In Bild 1 ist der Entwicklungsprozess bei der automatischen Code-Generierung dargestellt: Auf der linken Seite findet auf dem "absteigenden Ast" des V-Diagrammes die Systembeschreibung und Modellierung bis hin zur Codierung statt, während auf dem "aufsteigenden Ast" der Test und die Integration auf dem Steuergerät (SPS) erfolgt. Das graphische Modell der Regelstrecke (Stauhaltung), des Stellorgans (Wehr, Kraftwerk) und der Leittechnik in der Entwicklungsumgebung MATLAB & SIMULINK bildet die Grundlage für die Reglerentwicklung. Mit der Offline-Simulation werden die Reglerparameter bestimmt und verifiziert. Das Blockdiagramm der so erstellten Anwendung dient in der Folge als vollständige und detaillierte Anwendungsbeschreibung und somit auch als ausführbare Spezifikation auf einem anderen Zielgerät (SPS). Durch das automatisierte Generieren von Code aus dem SIMULINK-Modell verkürzt sich die Test- und Implementierungsphase ("aufsteigender Ast" des V-Diagrammes in Bild 1) erheblich. Die Verwendung der kompletten Werkzeugkette, von der Simulation bis hin zur automatischen Codegenerierung, gewährt eine hohe Robustheit des generierten Codes hinsichtlich Laufzeitfehler und Performance. Die Voraussetzungen und Grenzen der automatischen Codegenerierung für die Belange der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung wurden in den Jahren 2008-2009 erfolgreich evaluiert. Im Jahr 2010 wird mit dieser Methodik der Koordinator der oberen Mosel auf eine SPS portiert werden.

In dem BAW-Brief 1/09 werden mit 3 Artikeln die modellgestützte Festlegung der Regelparameter (598-W), die automatische Code-Generierung (600-W) und Ergebnisse der Umsetzung (599-W) ausführlich beschrieben.

In [5] ist die Wirkung der Filterung der Wasserstandsmessung anhand eines Schleusenfilters erläutert. Die Filter werden als PT1-Glieder umgesetzt (Tiefpass 1. Ordnung), die ursprünglich als Analogfilter mit elektronischen Bauelementen wie Kondensatoren, Spulen und Widerständen vor Ort eingebaut wurden. Mittlerweile werden diese PT1-Glieder in der SPS digital aufgebaut, haben aber weiterhin die Eigenschaft des PT1-Gliedes, dass sie eine Phasenverschiebung erzeugen. Im Jahr 2009 liefen erste erfolgversprechende Untersuchungen, diese Filter eventuell durch digitale Filter zu ersetzen. Unter MATLAB & SIMULINK steht mit der Signal Processing Toolbox eine Erweiterung zur Verfügung, mit der ein Digitalfilter zügig und flexibel entworfen und analysiert werden kann. Der Aufwand der Umsetzung des Digitalfilters in eine SPS kann mit der automatischen Code-Generierung deutlich reduziert werden.

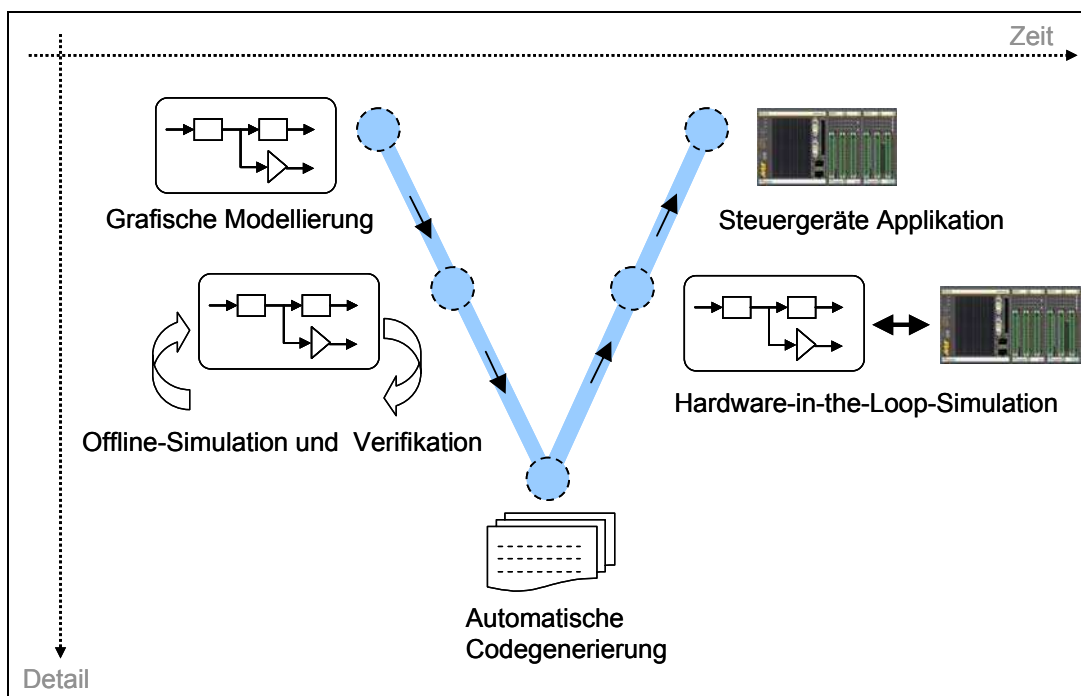


Bild 1: Darstellung des Entwicklungsprozesses der automatischen Code-Generierung als V-Diagramm

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die 2009 begonnenen Untersuchungen zu den Digitalfiltern werden im Jahr 2010 fortgesetzt. Es wird geprüft, ob mit den digitalen Filtern eine Verbesserung der lokalen OW/Q-Regelung erreicht wird.

Im Forschungskompodium 2008 wurde erläutert, dass die modell-prädiktive Regelung (MPR) ein aktuelles Forschungsgebiet darstellt (Untersuchungsziele 2 und 3). Es zeigt sich, dass dieser Ansatz dann Vorteile verspricht, wenn er als übergeordneter Regler mehrere Staustufen koordiniert. Die MPR erfordert jedoch ein Modell der Fließstrecke. Die St. Venantschen Gleichungen der Fließstrecke werden dazu um einen Arbeitspunkt linearisiert und in eine Zustandsraumdarstellung überführt. Damit wird das Modell der Fließstrecke für einen Zustandsregler nutzbar und ist für Optimierungsrechnung geeignet. Problematisch erscheint die Zustandsschätzung. Die Zustandsraumdarstellung der Fließstrecke wird im Jahr 2010 untersucht. Alle neuen Erkenntnisse werden 2011 bezüglich ihrer Praxisrelevanz abschließend bewertet.

## 5 Literatur

- [1] Kühne, A. (1975): Flusstaueregulierung, Grundsätzliche Betrachtungen mit systemtheoretischen Methoden. Mitteilungen der Versuchsanstalt f. Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Technische Hochschule Zürich
- [2] Gebhardt, M. & Wohlfart, S. (2009): Erste Erfahrungen mit der Umsetzung der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung an der Mosel. BAW-Brief 1/09, 599 - W
- [3] Gebhardt, M. & Wohlfart, S. (2009): Reglerentwurf und automatische Codegenerierung. BAW-Brief 1/09, 600 - W
- [4] Schmitt-Heiderich, P. (2009): Modellgestützte Festlegung von Regelungsparametern. BAW-Brief 1/09, 598 - W
- [5] Tätigkeitsbericht der Bundesanstalt für Wasserbau (2008): Entwicklung und Simulation von Regelungsalgorithmen am Beispiel von Staustufen an Neckar und Mosel. Wasserbau im Binnenbereich, Kapitel 4.3, S. 60 ff.

## 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

Mit dem Erscheinen des Mitteilungsblattes Nr. 91 „Untersuchungen zum Einsatz von Schlauchwehren an Bundeswasserstraßen“ im Dezember 2007 und dem BAW-Kolloquium „Elastische Wehrverschlüsse an Wasserstraßen“ im Juni 2008 wurden die Ergebnisse des FuE-Vorhabens Nr. 8160 publiziert und das bisherige Forschungsvorhaben abgeschlossen. Insgesamt drei Schlauchwehrranlagen in der WSV existieren oder befinden sich im Bau und an mehreren Staustufen werden Schlauchwehre als eine Planungsvariante in Betracht gezogen, so z.B. an der Allerstaustufe Hademstorf oder der Mainstaustufe Oberrau. Aus dem abgeschlossenen FuE-Vorhaben und den sich im Betrieb, im Bau bzw. in der Planung befindlichen Schlauchwehrranlagen haben sich eine Reihe von neuen wasserbaulichen und bautechnischen Fragestellungen ergeben. Zusammen mit den bisherigen Ergebnissen soll ein Merkblatt für die Bemessung und Konstruktion erstellt werden, das hydraulische und statische Bemessungsgrundlagen, Werkstoffanforderungen und Bemessungsbeispiele enthalten wird und dem planenden Ingenieur als Leitfaden bei der Entwurfsaufstellung dienen soll.



Bild 1: Schlauchwehr Bannetze an der Aller unmittelbar nach der Fertigstellung im Oktober 2009

#### 1.2 Bedeutung für die WSV

Die ersten Schlauchwehrranlagen haben Pilotcharakter für die WSV, da der Verschlusstyp erstmalig an schiffbaren Flüssen mit ihren speziellen Anforderungen (Abfluss- und Stauzielregelung, Materialspezifikationen, Berücksichtigung des höheren Risikopotenzials, ...) eingesetzt wird. Schlauchwehrranlagen können enorme Bedeutung gewinnen, wenn man sich vergegenwärtigt, dass unter den mehr als 280 Wehrranlagen der WSV die Hälfte älter als 50 Jahre ist und in den nächsten Jahren ein hoher Sanierungsbedarf zu erwarten ist. Aufgrund der vielfältigen Fachfragen und Wissenslücken im Zusammenhang mit der Schlauchwehrtechnologie ergibt sich die Notwendigkeit einer intensiven fachwissenschaftlichen Begleitung der Projekte und einer gezielten wissenschaftlichen Vertiefung einzelner Fragestellungen durch die BAW.

### 1.3 Untersuchungsziel

Folgende Forschungsschwerpunkte sind in dem FuE-Vorhaben enthalten:

- die Analyse und Optimierung vorhandener Füll- und Entleersysteme (F1) vor dem Hintergrund betrieblicher Anforderungen, wie z.B. Stellgeschwindigkeiten, Pumpenleistungen,
- Untersuchungen zur Erfassung oder zum Ersatz der fehlenden geometrischen Stellgröße im Zusammenhang mit der Automatischen Abfluss- und Stauzielregelung (F2), wie z.B. die Bestimmung der Schlauchhöhe über Drucksonden, über den Innendruck oder das Schlauchvolumen,
- die Weiterentwicklung von Maßnahmen gegen Schwingungen (F3) durch die Auswertung bisheriger Betriebserfahrungen und die Entwicklung neuer wirkungsvoller Maßnahmen mit Hilfe von In-situ Untersuchungen,
- die Analyse zweiaxialer Spannungszustände in der Membran im Anschluss an die Wehrpfeiler bzw. Wehrwangen zur Ermittlung eines Stress Concentration Factors (SCF) mit Hilfe von Finite-Elemente-(FE) Berechnungen (F4),
- Untersuchungen zur Relaxation und Retardation der Schlauchmembran in der Klemmkonstruktion (F5) im Langzeitversuch "Großer Versuchsstand",
- Werkstoffuntersuchungen (F6), wie z.B. die Ermittlung der Trennkraft zwischen Gewebe und Elastomer oder Beschusstests zur Ermittlung möglicher Schäden durch Vandalismus sowie
- Untersuchungen zur Materialwahl für die Verankerungsschienen (F7) mit dem Ziel der Lebensdauerverlängerung und die Formulierung von Bemessungsregeln für die Materialien.

Eine ausführlichere Beschreibung ist dem Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2008 zu entnehmen.

### 2 Untersuchungsmethoden

Die Methoden orientieren sich an der Fragestellung und am Untersuchungsziel und beinhalten hydraulisch-numerische Berechnungen der Rohrhydraulik (F1), den modellbasierten Entwurf einer Regelung in MATLAB & Simulink (F2), In-situ Untersuchungen (F2, F3), Finite-Elemente-Berechnungen unter Berücksichtigung der Nichtlinearität, Stabilität und Eigenkontakt bei Schalenelementen (F4), Laborversuche am Langzeitversuchsstand, Untersuchungen an Normprobekörpern (F5, F6) sowie dynamische Prüfungen und Beschusstests an Fachinstituten (F6).

### 3 Ergebnisse

Seit September 2009 werden am Institut für Mechanik, KIT, im Rahmen des Forschungsschwerpunktes F4 verschiedene Fragestellungen mit Hilfe von Finite-Elemente-Analysen untersucht. Dabei werden zunächst Analysen zum Einfluss der Geometrie (Neigung der Wehrwangen/-pfeiler und der Befestigungsschienen) auf die Faltenbildung und die dabei auftretenden Spannungen durchgeführt (s. Bild 2). Neben den Materialeigenschaften bestimmt der seitliche Anschluss der Membran die Faltenbildung bei luft- und/oder wassergefüllten Schlauchwehren. Die Membran soll dabei einerseits im abgelegten Zustand nahezu spannungsfrei und eben auf dem festen Wehrkörper liegen. Andererseits soll im aufgestellten Zustand die Ausbildung der Falten im Hinblick auf Dichtigkeit und Materialbeanspruchung möglichst günstig sein. Die Optimierung der Geometrie erfolgt in erster Näherung zunächst mit Hilfe von Membranelementen. Dabei soll durch den Einbau sogenannter „Segment-Segment-Kontaktelemente“ auch der Kontakt zwischen Schlauchmembranteilen berücksichtigt werden. Zur Spannungsauswertung sollen mit Hilfe von Solid-Shell Elementen auch die Biegespannungen erfasst werden, die besonders im Bereich starker Krümmungen, wie z.B. im Faltenbereich oder im Bereich der Klemmschienen, auftreten. Die Anwendung geeigneter Materialgesetze für große Deformationen (z.B. ein Neo-Hooke und anisotropes Material) soll die Berechnung komplettieren.



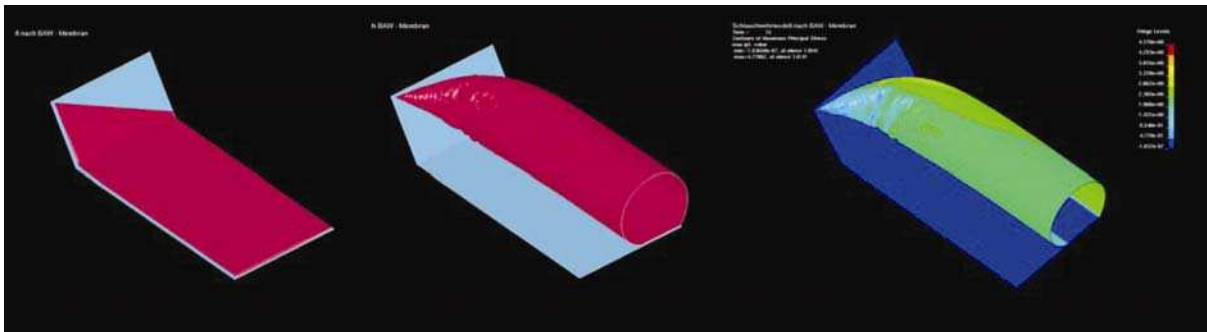


Bild 2: Finite-Elemente-Berechnung des Instituts für Mechanik, KIT für einen luftgefüllten Schlauch: Anfangszustand (entleert), Endzustand (gefüllt) und Spannungsverteilung in Umfangsrichtung

Bis Dezember 2011 befassen sich weitere Analysen mit der Bestimmung eines Stress Concentration Factor (SCF), der Stabilität gefüllter Schlauchwehre, dem Einfluss von Fertigung und Orthotropieeigenschaften auf die zulässigen Spannungen, den Schwingungseigenschaften eines fluidgefüllten Schlauchwehres, dem Einfluss von Mehrkammersystemen und der Anfahrung eines Schiffes. Erste Ergebnisse werden Anfang 2010 vorliegen.

Beim Beschussamt in Ulm wurden zur Abschätzung des Gefährdungspotentials "Vandalismus" Schlauchmembranproben mit Patronen verschiedener repräsentativer Waffenarten und Kaliber beschossen. Die Beschussstellen wurden zunächst stereomikroskopisch untersucht und bildanalytisch mit der Extended-Focal Imaging Methode ausgewertet. Die größten Durchmesser der Rückseiten der Beschussstellen waren in der Regel mehr als doppelt so groß wie die nahezu kreisförmigen Einschussstellen. Bild 3 zeigt exemplarisch eine stereomikroskopische Aufnahme für das Kaliber 308 Winchester, 7,62 x 51, Vollmantel-Spitz-Weichkern-Geschoss, mit der Geschossgeschwindigkeit 842 m/s.

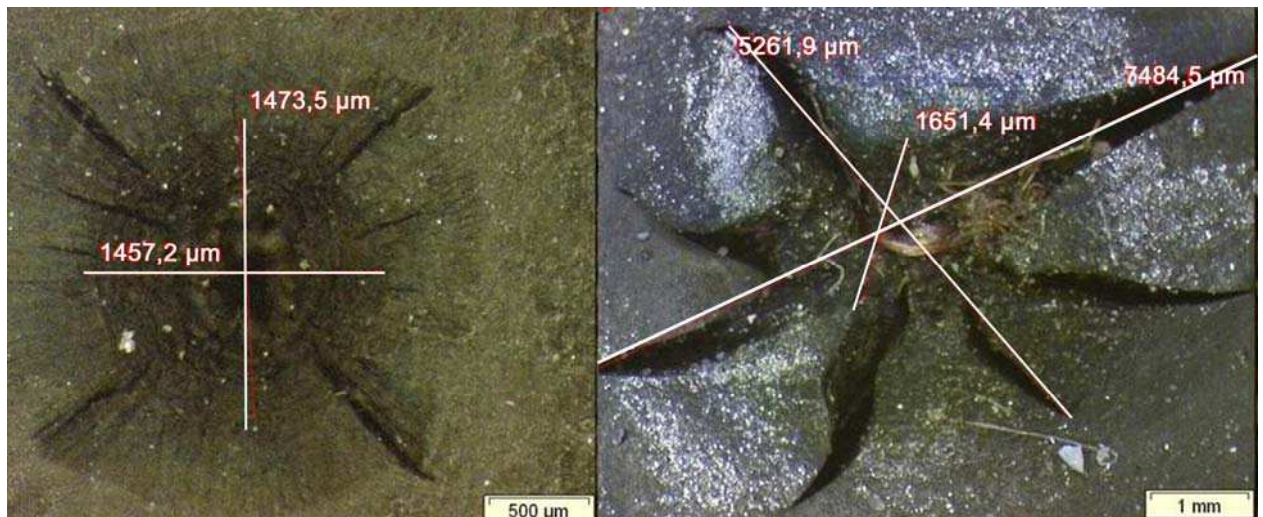


Bild 3: 14 mm dicke zweilagige Schlauchmembran. Links Einschussstelle in der Deckschicht. Rechts durchschossene Rückseite.

Aus den Betriebserfahrungen älterer, wassergefüllter Anlagen ist bekannt, dass bei kleineren Verletzungen mit einer täglichen Leckage von bis zu 2 m<sup>3</sup> die Betriebsfähigkeit der Anlage nicht beeinträchtigt wird. Zur Bewertung und Abschätzung mit den bisherigen Betriebserfahrungen wurde eine Messeinrichtung für die Prüfung der Wasserdurchlässigkeit der Einschussstellen konzipiert. An den Einschussstellen des Kalibers 22 lr (Sportschützen, Biathlon) wurden mit ca. 0,8 l/h die größten Wasserdurchlässigkeiten gemessen. Aus den beschossenen Materialproben wurden Schulterstäbe mit je-

weils mittigen Einschnittstellen für Zugversuche ausgestanzt. Die ersten Ergebnisse dieser Zugversuche liegen bereits vor.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Bisher konnte gezeigt werden, dass das Aufbringen von Deflektoren oder Störkörpern auf die Schlauchmembran wirkungsvolle Maßnahmen darstellen, um Resonanzschwingungen zu verhindern. Eine Störkörperreihe wurde an den Schlauchwehranlagen in der WSV realisiert (s. Bild 1). Da Störkörper auf der abgelegten Membran dem Angriff von Strömung, Sedimenten und Treibgut ausgesetzt sind, sollen mit Hilfe von In-situ Untersuchungen an einem bestehenden Schlauchwehr an der Saalach geprüft werden, ob durch profilierte Elastomerbänder, wie sie z.B. im Bergbau eingesetzt werden, eine ähnliche Wirkung erzielt werden kann. Ziel ist es, eine starke Erhöhung der Turbulenz in der Strömung zu erreichen und gleichzeitig die Angriffsfläche der Störelemente zu reduzieren (s. Bild 4).

Die unter Abschnitt 1.2 und 2. beschriebenen Untersuchungen sollen in den Jahren 2010 bis 2011 durchgeführt und im Jahr 2011 in Form eines Merkblattes dokumentiert werden.

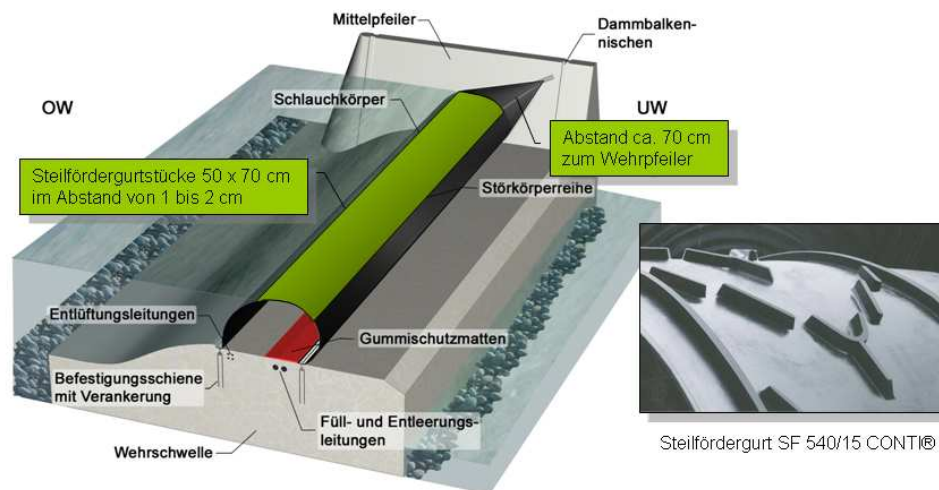


Bild 4: Alternative zur Störkörperreihe? - Turbulenz durch Profilierung. Geplanter In-Situ Versuch am Saalachwehr

#### 5 Literatur

- [1] Gebhardt, M. (2009): Wehranlagen mit elastischen Verschlüssen. In: Karlsruher Wirtschaftsspiegel, Nr. 52, pp.76.
- [2] Maisner, M.; Gebhardt, M ; Gabrys, U. (2009): Anforderungen an Werkstoffe für Schlauchmembrane. In: KGK - Kautschuk, Gummi, Kunststoffe, Heft 10, Hüthig Verlag, pp.537-539.
- [3] Maisner, M.; Gebhardt, M ; Gabrys, U. (2009): Anforderungen an Werkstoffe für Schlauchmembrane. IRC 2009, Internationale Kautschuk-Tagung, Poster-Session, 30. Juni – 2. Juli 2009, Nürnberg.
- [4] Maurer, A.; Hassler, M ; Schweizerhof, K. (2009): Modeling of inflatable dams partially filled with fluid and gas considering large deformations and stability. International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, Structural Membranes 2009, Barcelona.



**Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen****Netzplan-Nr.:** A39530410035**Projektleiter:** BOR T. Dettmann, Dipl.-Ing. R. Zentgraf, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W 4), Flusssysteme I (W 1)**E-Mail:** thorsten.dettmann@baw.de, rolf.zentgraf@baw.de**1 Problemstellung und Ziel**

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, Fahrspurweite u. a. m. können Verkehrsszenarien simuliert und in deren Ergebnis Entscheidungen zur Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen unter Berücksichtigung wechselnder Wasserstände und unterschiedlicher Schiffstypen getroffen werden. Als wesentliches Ergebnis simulierter Verkehrsszenarien wird der Verkehrsflächenbedarf wasserstandsabhängig ermittelt, welcher Grundlage für eine Tiefenanalyse ist und in deren Gesamtheit eine wasserstands- und verkehrsabhängig Engpassanalyse für die Befahrbarkeit einer Wasserstraße durchgeführt werden kann.

**1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

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, 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, sollte 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 Engpassanalysen (z.B. bei laufenden 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. Rhein 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 hydronumerisch/fahrdynamisches Modell für die stationäre Kreisfahrt entwickelt, wobei die Berechnung der Trägheitskräfte auf den Kirchhoffschen Bewegungsgleichungen für starre Körper beruht. Unter Verwendung der Theorie schlanker Körper wird mit Hilfe einer lokalen Impulsanalyse im schiffsnahen Kontrollraum die auf den Schiffskörper wirkende hydraulische Querkraftverteilung abgeschätzt. 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. Dieses Verfahren wird auf die Bewegungsgleichungen für alle 6 Freiheitsgrade erweitert und soll anschließend in den Schiffsführungssimulator der BAW implementiert werden. 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.



Bild 1: Fahrstand des Binnenschiffsführungssimulators der BAW Karlsruhe

### 3 Ergebnisse

Mit dem Abschluss dieser Grundlagenentwicklung gingen auch der Abschluss der Entwicklungen und Tests der Verfahren PeTra und BoatSim einher. Das Verfahren PeTra 1D liegt als MicroStation-Applikation vor, so dass es direkt in der Arbeitsumgebung der WSV eingebettet ist. 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. Gegenwärtig wird PeTra für die Engpassanalyse am Rhein eingesetzt, wobei die virtuelle Navigation zum Einsatz kommt. Hierbei wird das verfügbare Fahrwasser analysiert, indem alle 100 m querprofilorientiert das Befahrbarkeitspotenzial ermittelt wird. Die Potenzialverteilung in einem Profil setzt sich aus den örtlich geltenden Verkehrsregeln, den Tiefenverhältnissen, der Strömungsverteilung und Sonderrandbedingungen wie z.B. Brückendurchfahrten oder Stromteilungen zusammen, wobei jede Komponente gesondert gewichtet wird. Für die Bereiche mit dem höchsten Potenzial werden für jedes Profil Befahrbarkeitsbereiche berechnet und durch diese eine Kursachse konstruiert, auf der letztendlich das Bemessungsschiff „fährt“ und mit dem die Breitenengpassanalyse durchgeführt wird.

Im Rahmen des laufenden Projektes „Engpassanalyse Rhein“ wurde für die Strecke Iffezheim bis Lobith ein durchgehendes hydraulisch-fahrdynamisches (HFD-)Modell erstellt und mit seiner Hilfe Breitenengstellen erkannt. Darüber hinaus wurden die Flächen ermittelt, die von der Schifffahrt real genutzt werden, um auf deren Grundlage eine Tiefenengpassanalyse durchzuführen. Für die Ermittlung maximal möglicher Verbandsabmessungen in der Gebirgsstrecke des Rheins wurde das HFD Modell ebenfalls eingesetzt, indem für vier Abflüsse zwischen GIW bis HM2 die Schleppkurven von übergroßen, derzeit noch nicht existierenden Schubverbänden, berechnet und bewertet wurden. Die Bereitstellung der flussbaulichen Daten und die Verkehrssteuerung für PeTra erfolgt durch BoatSim. Durch den in BoatSim implementierten ECDIS-Standard ist ein schneller Datenaustausch mit Schifffahrtstreibenden und Forschungseinrichtungen, die sich mit nautischen Fragestellungen beschäftigen, gewährleistet. Schifffahrtstreibende haben zwischen 2001 und 2003 im Rahmen des von der WSD Südwest organisierten ARGO-Probebetriebes ihre Fahrten aufgezeichnet. In dem Verfahren BoatSim können diese Dateien eingelesen und innerhalb der ECDIS-Karten (ENC) nachvollzogen und mit Berechnungsergebnissen aus PeTra verglichen werden.

Das Verfahren PeTra 2D besteht aus drei Bewegungsgleichungen, die die Bewegung eines Schiffes in der Ebene unter Berücksichtigung eines 2D tiefengemittelten Strömungsfeldes beschreiben. Dieses Verfahren wird gegenwärtig auf 6 Freiheitsgrade erweitert, um künftig auch Squat und Trimm mit bestimmen zu können.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Entwicklungsarbeiten dieses F+E Vorhabens wurden Ende 2006 abgeschlossen. In 2008 wurde begonnen, für das fahrdynamische Modell eine Datenbank mit Bemessungsschiffen der unterschiedlichsten Wasserstraßenklassen und ein zugehöriges Validierungsdokument zu erstellen. Die im Rahmen der Forschungsvorhaben entwickelten Modelle wurden an das Verfahrensbetreuungszentrum 6 (VBC6) zur weiteren Pflege übergeben. Im Jahr 2008 wurde mit der Erstellung des Forschungsberichtes begonnen.

2010: Erweiterung der Bewegungsgleichung von PeTra 2D auf 6 Freiheitsgrade und Fertigstellung des Forschungsberichtes

**Wartezeiten vor Engstellen****Netzplan-Nr.:** A39530410036**Projektleiter:** BDir 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**

Durch die generell steigende Verkehrsleitung auf deutschen Binnenwasserstraßen bei gleichzeitig veränderter Binnenflotte mit größeren Fahrzeugen kann es bei einigen Wasserstraßen zu vermehrten Wartezeiten vor Engstellen kommen. 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 sind deshalb, neben der Kenntnis des Verkehrsflächenbedarfs von Benennungsschiffen im Vergleich zur vorhandenen Fahrwasserbreite, auch die verkehrlichen Randbedingungen zu beachten. Diese können durch bekannte Ansätze zur Abschätzung von Wartezeiten, wie sie u. a. im Kompodium Kosten-Nutzen-Analysen des BMVBS angegeben sind, nur grob angenähert berücksichtigt werden. Besser ist es, das Verkehrsgeschehen, unter Beachtung zufälliger bzw. durch Schleusungsvorgänge getakteter Verkehre zu simulieren.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

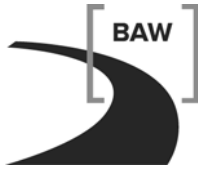
Wartezeiten vor Engstellen mindern den volkswirtschaftlichen Nutzen des Verkehrsträgers Binnenschiff. Dieser muss u. a. dem Aufwand zur Engstellenbeseitigung gegenübergestellt werden. Wenn dieser unverhältnismäßig hoch ist, werden Engpässe, die Begegnungen oder Überholungen von Fahrzeugen ausschließen, hingenommen. Für diese Entscheidung ist die Quantifizierung von Wartezeiten unerlässlich, insbesondere dann, wenn es zur Staubildung an Engstellen kommen kann.

**1.3 Untersuchungsziel**

Die Untersuchungen zielen auf die Entwicklung, Verifikation und Anwendung eines Verkehrssimulationsmodells für Binnenschiffe in Gewässern mit wechselnden Wasserständen unter Einschluss von Schleusen und Häfen, das mit möglichst wenigen Eingabedaten, z.B. hinsichtlich der Schiffsankünfte an Kontrollstellen, auskommt. Dazu soll das Verfahren auf eindimensionalen Modellen der BAW aufbauen.

**2 Untersuchungsmethoden**

Die Simulation des Verkehrsgeschehens erfolgt mit dem Verfahren BISS (Binnenschiffahrts-Simulator). Es wurde nach vorgegebenen fahrdynamischen Algorithmen der BAW von der Firma TraffGo / Duisburg im Auftrag der BAW entwickelt. Die Fahrdynamik wird im Grundsatz wie bei den Modellverfahren PeTra und BSquat erfasst. BSquat errechnet die mögliche Schiffsgeschwindigkeit bei vorgegebener max. Motorleistung unter Beachtung des Squat und PeTra die nötige Verkehrsfläche bei gegebener Kursachse, Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang. In BISS bedingen beide Verfahren einander, denn die nötige Verkehrsflächebreite bestimmt die verfügbare Fahrwassertiefe und damit den zulässigen Squat und die mögliche Schiffsgeschwindigkeit. Vereinfachend werden in BISS Kurvenradius und Kursachse als zeitinvariant angenommen, um die Rechenzeit zu begrenzen. Die Summe der Fahrspurweiten der beteiligten Fahrzeuge wird nun genutzt, um, eingedenk des vorhandenen Fahrwassers in Höhe der Kimmlinie in Fahrt, zu überprüfen, ob Begegnungen oder Überholungen möglich sind oder nicht. Das Programm entscheidet dann, entsprechend der Verkehrsregeln, welche Fahrzeuge an welcher Stelle warten müssen, um Konflikte zu vermeiden. Diese Konflikterkennung und -Beseitigung bildet den Kern des Verfahrens.



Die Verfahrensentwicklung wurde im Arbeitsjahr 2007 algorithmisch weitgehend 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. Im Hinblick auf eine umfänglichere Anwendung des Programms, z.B. für das Teilprojekt 4.04 des KLIWAS – Forschungsvorhabens (Mindestbreiten der Fahrrinne), wurde das Programm einem Reengineering durch das Ing.-Büro Huber, Karlsruhe, unterzogen. Das Reengineering ist hinsichtlich des bisherigen Funktionsumfangs abgeschlossen. Weiterentwicklungen sind im Arbeitsjahr 2010 nach Bedarf für das v. g. KLIWAS – Projekt vorgesehen. Beispielsweise stehen inzwischen verbesserte Algorithmen für die Ermittlung der notwendigen Verkehrsflächenbreiten zur Verfügung, mit denen der Einfluss des Tiefgangs- zu Wassertiefen-Verhältnisses und einer aktiven Bugruderanlage besser als bisher berücksichtigt werden kann.

### **3 Ergebnisse**

Im Arbeitsjahr 2009 konnte das Reengineering noch nicht vollständig abgeschlossen werden. dies ist bis Ende 2010 vorgesehen.

### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Für 2011 ist die Anwendung des Programms im Wirkbetrieb für den Rheinabschnitt Mainz bis St-Goar vorgesehen.

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

**Netzplan-Nr.:** A39530410037

**Projektleiter:** BDir 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.

#### **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**

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 nachzuziehen.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Die bisherigen Erkenntnisse stützen sich überwiegend auf Modelluntersuchungen am DST in Duisburg und Naturuntersuchungen zum Zusammenhang von Mindestflottwasser und Ansaugbeginns 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 Weiterentwicklung des Verfahrens 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 auslöst. Um diese Frage abschließend zu klären, sind ergänzende Modellversuche am Leichtweiß-Institut der Universität Braunschweig (LWI) vorgesehen. Dabei soll das Strömungsfeld im Ansaugbereich typischer Binnenschiffspriopeller mit einem moderne 3D – Messverfahren (PIV) möglichst exakt und instationär aufgemessen werden. Diese Untersuchungen werden mit den im BAW F&E - Vorhaben 8154 (Einwirkung Propellerstrahl auf Sohle) vorgesehenen Kolkuntersuchungen kombiniert.

### **3 Ergebnisse**

Im Arbeitsjahr 2009 wurde die Modellentwicklung des Verfahrens BSQUAT weiter vorangetrieben. Wesentliches Ziel war dabei die Kalibrierung von Ansätzen für den Schiffswiderstand an fahrdynamischen Engstellen, unter Berücksichtigung der Sohlenrauheit und der Strömungsgeschwindigkeit, da diese Größen die erforderliche Antriebsleistung und damit die Ansaugwahrscheinlichkeit von Steinen

bestimmen. Mit den im GBB (Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen, BAW – Mittellungen Nr. 87, 2004) beschriebenen Algorithmen kann daraus die Propellerdrehzahl in Abhängigkeit von Propellerdurchmesser, Steigung und Schiffsgeschwindigkeit ermittelt werden. Hierfür wurde die eindimensionale Propellertheorie weiterentwickelt und anhand von Messdaten aus Modellversuchen des DST (Bericht 1889) zu Propellerschub und Motorleistung kalibriert. Diese Ergebnisse wurden in 2009 in die Softwareversion von GBB implementiert. Weiterhin wurden sie im Modellverfahren PeTra2D für Befahrbarkeitsuntersuchungen sowohl für die Widerstandsermittlung als auch zur Berechnung der Ruderquer- und Längskräfte verwendet. Weitere Modellentwicklungen wurden wegen der inzwischen beauftragten Untersuchungen am LWI zurückgestellt.

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

2010: Aufmessung von 3D-Strömungsfeldern im Ansaugbereich von Schiffspropellern am LWI

2011: Abschluss des Vorhabens

#### **5 Literatur**

- [1] D. Maaß, B. Söhngen (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
- [2] (in Vorbereitung) :  
S. Wassermann, B. Söhngen, T. Dettmann, C. Heinzelmann (2010): Untersuchungen zur Bestimmung von Fahrrinnenmindestbreiten für Binnenwasserstraßen, PIANC-Kongress Liverpool (mit Widerstandsformel)

## **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 gaben Anlass dazu, den Erkenntnisstand über hydraulische Belastungen der Wasserstraße durch Propulsionsströmungen grundlegend aufzuarbeiten. Dies erfolgte im Zeitraum von 2005 bis 2009 in enger Zusammenarbeit zwischen der BAW und dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) der TU Braunschweig in drei Phasen: der Durchführung einer umfassenden Literaturrecherche und Erstellung einer Datenbank zu vorliegenden Schraubenkolk-Untersuchungen, der regressionsanalytischen Untersuchung vorhandener Messdaten aus Modell- und Naturuntersuchungen zur Ermittlung einer Formel für die Endkolkentiefe infolge von Schraubenstrahlen und der Auswertung von Messergebnissen zur Ermittlung und Überprüfung von Ansätzen für die zeitliche Kolkbildung durch Propellerstrahlen.

Die Regressionsanalyse führte zur Ableitung einer verbesserten Formel für die zu erwartende Endkolkentiefe. Hierbei zeigte sich jedoch, wie auch bei den Untersuchungen zur Prognose der zeitlichen Entwicklung von Kolkiefen, insbesondere für kurzzeitige Belastungen der Gewässersohle aus Anfah- und Aufstoppvorgängen von Schiffen, ein erheblicher Forschungsbedarf zur Berücksichtigung von Wirkungen aus Schiffsantrieb, Heckform und Ruderausbildung sowie aus dem Drall und der Strahlurbulenz auf die Strahlausbreitung und die Sohlenerosion. Für die Erfassung dieser Zusammenhänge werden physikalische Modelluntersuchungen favorisiert.

Die numerische Behandlung komplexer Geometrien und Strömungen ist gegenwärtig aufgrund der hohen Rechenzeiten mit konventionellen CFD-Verfahren nur begrenzt möglich. Fachfremde mathematische Modellverfahren wie z. B. die Lattice-Boltzmann-Methode (LBM) mit Anwendung auf dem Gebiet der Gasdynamik erfordern weniger Rechenzeit und Speicherkapazität. Ihre Anwendbarkeit für die Simulation der Schraubenstrahlausbreitung und der resultierenden Sohlenerosion ist jedoch noch nachzuweisen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Untersuchungen führen zu einer Verbesserung der bestehenden Berechnungsverfahren zum Einfluss der Schifffahrt auf die Sohlenerosion, u. a. der 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**

Im Berichtsjahr 2009 wurden die drei nachstehenden Ziele verfolgt:

- Ableitung einer Formel zur Bestimmung von Kolkiefen infolge kurzzeitiger Schraubenstrahlbelastungen aus theoretischen Untersuchungen und Messdatenauswertungen,



- Vorbereitung eines Labormesstages zur Durchführung von experimentellen Untersuchungen zu offenen Fragen der Schraubenstrahlausbreitung und -erosion und

Nachweis der prinzipiellen Eignung der Lattice-Boltzmann-Methode für die strömungsmechanische Problemstellung anhand von Nachrechnungen eines Naturversuchs.

## 2 Untersuchungsmethoden

### **Theoretische Untersuchungen zur zeitlichen Entwicklung des Propellerkolk**

Ausgangspunkt für die theoretischen Untersuchungen zur Ableitung einer Formel für den zeitlichen Propellerkolk ist folgende Bilanzgleichung, wonach die Änderung des Kolkvolumens pro Zeiteinheit gleich der Geschiebetransportrate über die Kolkbreite ist [2]:

$$(1 - n_p) \frac{dV_K}{dt} = q_s b_k \quad (1)$$

Hierin sind  $n_p$  die Porosität,  $V_K$  das Kolkvolumen,  $t$  die Zeit,  $b_k$  die Kolkbreite und  $q_s$  die volumetrische Geschiebetransportrate.

Aus der Bilanzgleichung wurde im vergangenen Berichtszeitraum bereits eine analytische Näherungsformel für die zeitliche Entwicklung von Propellerkolken hergeleitet. Die Weiterführung der theoretischen Untersuchungen erfolgte durch die numerische Auswertung von Gl. (1) nach Diskretisierung. Das Kolkvolumen zum Zeitpunkt  $(t+\Delta t)$  kann aus dem Kolkvolumen zur Zeit  $(t)$  wie folgt ermittelt werden:

$$V_k^{t+\Delta t} = V_k^t + \frac{q_s b_k^t}{(1 - n_p)} \Delta t, \text{ mit } V_k^t = l_k^t b_k^t \varepsilon^t c_v \text{ und } V_k^{t+\Delta t} = l_k^{t+\Delta t} b_k^{t+\Delta t} \varepsilon^{t+\Delta t} c_v \quad (2), (3) \text{ u. } (4)$$

Dabei sind  $l_k$  die Kolklänge,  $\varepsilon_k$  die Kolkhöhe und  $c_v$  ein Kolkvolumen-Koeffizient. Um Gl. (2) für die Kolkhöhe nach Substitution von (3) u. (4) lösen zu können, müssen Kolklänge und -breite als Funktion der Kolkhöhe und/oder anderer gegebener Größen ausgedrückt werden. Mit den getroffenen Annahmen wurde nachstehende Differenzgleichung für die iterative Bestimmung der zeitabhängigen Kolkhöhe erhalten:

$$\left( \frac{h_p + \varepsilon^{t+\Delta t}}{2} \ominus \frac{h_p - \frac{D_p}{2}}{\tan \alpha} \right) c_1 \frac{h_p + \varepsilon^{t+\Delta t}}{2} \ominus t \varepsilon^{t+\Delta t} c_v = \frac{h_p + \varepsilon^t}{2} \ominus \left( \frac{h_p + \varepsilon^t}{2} \ominus \frac{h_p - \frac{D_p}{2}}{\tan \alpha} \right) c_1 \varepsilon^t c_v + \frac{q_s}{(1 - n_p)} \Delta t \quad (5)$$

Der Parameter  $\ominus$  ermittelt sich aus der Geometrie der Strahlausbreitung und  $c_1$  ist ein Geometrie-Koeffizient. Des Weiteren bezeichnen  $\alpha$  den äußeren Winkel der Strahlausbreitung,  $D_p$  den Propellerdurchmesser und  $h_p$  den Abstand der Propellerachse von der ebenen Sohle.

### **Experimentelle Untersuchungen**

Zur Klärung offener Fragen der Schraubenstrahlbelastung, des sohnnahen Strömungsfeldes, der Sohlenschubspannung sowie der zeitlichen Kolkentwicklung in unterschiedlichen Sohlenmaterialien, wurde das LWI mit der Durchführung experimenteller Untersuchungen beauftragt. Die Untersuchungen werden mit einem GMS (Länge: 110 m, Breite: 11,45 m) im Maßstab 1:16 durchgeführt, wobei zwei Schraubenantriebe (Kaplanpropeller in Düse und nicht ummantelter Wageningen-Propeller) und zwei Ruder (Zentralruder und Zwillingsruder) eingesetzt werden. Zur Erfassung des räumlichen Strömungsfeldes hinter dem Schiff wird als berührungsloses optisches Messverfahren die Particle Image Velocimetry (PIV) angewendet. Das Messprinzip beruht darauf, im Fluid enthaltene Partikel (Tracer) zu verfolgen und ihre Geschwindigkeit in aufgenommenen Bildern anhand bekannter Abbildungs- und Zeitabstände aus deren zeitlicher Verschiebung zu bestimmen. Es ermöglicht eine räumlich hoch aufgelöste Erfassung der turbulenten Propulsionsströmung hinter dem Schiff.

### **Dreidimensionale hydronumerische Simulation der Schraubenstrahlausbreitung**

Für die Eignung eines dreidimensionalen HN-Verfahrens für die Lösung vorliegender Fragestellungen sind insbesondere drei Kriterien zu erfüllen [1],

1. eine effiziente Modellierung von Strömungen mit Fluid-Struktur-Kopplung (engl. Fluid Structure Interaction, FSI)
2. eine zeitgenaue Modellierung turbulenter Strömungen, die u. a. auch Aussagen über mesoskalige Schwankungen des Geschwindigkeitsfeldes erlaubt und
3. die Option, in naher Zukunft die Rechenzeit für dreidimensionale turbulente Strömungssimulationen durch Verwendung von General-Purpose-Graphikprozessoren (GPGPUs) drastisch zu reduzieren.

Bei allen drei Aspekten hat sich der Einsatz der LBM am Institut für rechnergestützte Modellierung im Bauingenieurwesen (IRMB) der TU Braunschweig in vielfältigen Forschungs- und Auftragsprojekten bewährt, weshalb die Verwendung dieses Verfahrens für die Simulation der Schraubenstrahl- ausbreitung favorisiert wurde.

Um die Eignung dieses Verfahrens für die vorliegende Problemstellung zu prüfen, wurde die numerische Nachrechnung eines Naturversuchs der BAW vom Oktober 2005 am Wesel-Datteln-Kanal vereinbart. Ziel war die Simulation des quasistationären Abströmfeldes hinter einem vertäuten Schiff für zwei Schiffstiefgänge bei konstanter Propellerdrehzahl und einem Ruderwinkel von 0 Grad. Als Randbedingungen waren die Schiffsgeometrie mit Antrieb (Propeller, Düse mit Spoiler, Doppelruder, Propellergeometrie drehend) und die vertikale Begrenzung durch feste Sohle und Wasseroberfläche zu berücksichtigen, wobei der Einfluss seitlicher Begrenzungen zu vernachlässigen war. Als Rechengebiet wurde ein Nachlaufbereich hinter dem Propeller mit einer Länge von ca. 50 Propellerdurchmessern festgelegt.

### 3 Ergebnisse

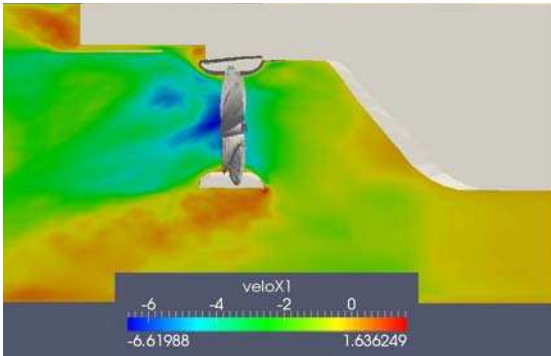
Momentan sind verlässliche Prognosen zur Kolk-tiefenentwicklung aus kurzzeitigen Schraubenstrahlbelastungen mit der entwickelten **Rekursionsgleichung**, Gl. (5), für die Praxis nur bedingt möglich. Die Ursache liegt darin, dass für die Kalibrierung der Koeffizienten und Auswertung der Beziehung für kurzzeitige Belastungen nur wenige Datensätze vorlagen und getroffene Annahmen zur Kolkgeometrie, zum maßgebenden Korndurchmesser, zur Porosität und der Geschiebetransportrate nur unzureichend belegt sind. Bei Verbesserung der Datengrundlage unter kontrollierten Randbedingungen ist das Verfahren jedoch erfolgversprechend, da einzelne Versuchsreihen durch individuelle Kalibrierung bereits gut abgebildet werden konnten.

Für die Durchführung der **experimentellen Untersuchungen** am LWI (s. Abschnitt 2) fertigte das Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme (DST) ein Hinterschiffsmodell (s. Bild 1). Für weitergehende Versuche mit fester und beweglicher Sohle am stationären Schiff (s. Abschnitt 4) wurde ein Versuchsbecken am LWI eingerichtet. Das Modellschiff wurde zur Erfassung von Ruderwinkel, Propellerdrehzahl, Schub- und Drehmomentmessung messtechnisch ausgerüstet.



Bild 1: Hinterschiff des GMS-Teilmodells (DST-Modell M1850) mit Propeller in Kortdüse und Zwillingruder (links) und freischlagendem Propeller mit Zentralruder (rechts)

Zu den **HN-Berechnungen** mit der LBM wurde ein vorläufiges numerisches Modell erstellt und vorläufige Ergebnisse der ersten Testrechnungen mit rotierendem Propeller vorgestellt [1]. Als Strömungsmodell wurde zunächst ein einfacher LES-Gitter-Boltzmann-Ansatz auf blockstrukturierten, kartesischen Gittern gewählt, der eine quadratische Konvergenz in Raum und Zeit besitzt. Die freie Wasseroberfläche wurde als Slip-Randbedingung implementiert, und der Zu- und Ablauf wurde mit einem Referenzdruck versehen. Alle weiteren Berandungen unterliegen der Hafrandbedingung.



*Bild 2: Seitenansicht der Heckpartie des GMS mit Geschwindigkeitskomponente der Propulsionsströmung (in m/s) in Fließrichtung, gemittelt über 4 s, nach 45 s Rechenzeit*

Die Auflösung im Bereich der Schraube liegt bei diesen ersten Testläufen bei 1.3 cm und nimmt nach außen auf 10.4 cm ab. Der Zeitschritt beträgt auf dem feinsten Gitterlevel ca. 0.00005 s, auf dem größten das Achtfache. Ein Ergebnis des ersten Testlaufes mit ca. 15 Millionen Gitterpunkten ist nach ca. 45 Sekunden Echtzeit in Bild 2 dargestellt. Die Abbildung lässt erkennen, dass nach 45 s noch kein stationärer Zustand erreicht ist, da die Schraube das Wasser im Wesentlichen von unten zieht (transientes Verhalten).

Die numerischen Testrechnungen lassen folgende vorläufige Schlussfolgerungen zu [1]:

Die Simulation der Fluid-Struktur-Interaktion (hier durch die rotierende Schiffsschraube) ist erfolgreich umgesetzt worden, verdoppelt aber die Rechenzeit, da in jedem Zeitschritt lokale Gitterkorrekturen berechnet werden müssen. Die sehr gute Parallelisierungseffizienz des Verfahrens leidet darunter nicht.

Die zeitgenaue Modellierung turbulenter Strömungen mittels LES, die u. a. auch Aussagen über mesoskalige Schwankungen des Geschwindigkeitsfeldes erlauben, ist erwartungsgemäß sehr rechenaufwändig, aber möglich. Es ist zu prüfen, welcher reale Zeitraum zu einem (zeitlich gemittelten) dynamischen Strömungsgleichgewicht führt.

Die Rechenzeiten für die Produktionsläufe werden sich in der Größenordnung von einigen Tagen auf 100+ Prozessoren bewegen. Eine Beschleunigung durch den Einsatz von GPUs (mindestens eine Größenordnung) wird mithilfe der Portierung der FSI-Algorithmik angestrebt.

Die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse kann erst nach Auswertung der anstehenden Produktionsläufe bewertet werden. Die vorläufigen Ergebnisse in der Umgebung der Schraube erscheinen plausibel.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Projektarbeit beinhaltet im Weiteren sowohl die Verbesserung und Erweiterung vorhandener semiempirischer Berechnungsmethoden auf Grundlage eines umfangreichen Laborversuchsprogramms als auch die Kalibrierung und Validierung numerischer Verfahren auf Grundlage der Ergebnisse im physikalischen Modell, um ein praxistaugliches analytisch-numerisches Verfahren für die Schraubenkolkbemessung hervorzubringen [3]. Die geplanten Arbeiten zu den experimentellen Untersuchungen am LWI erfolgen in vier Phasen. Nach der in der ersten Phase vorgenommenen Ausrüstung des Versuchserinnes und der messtechnischen Ausstattung des Schiffmodells erfolgen in der zweiten Phase Kolkversuche für Manöversituationen, d. h. für ein stationäres Schiff. In einer

dritten Phase werden Referenzmessungen für die Kolkversuche und Messungen für die Einrichtung des PIV-Systems über einer festen Sohle durchgeführt. Die vierte Versuchsphase beinhaltet die Untersuchung verschiedener instationärer Belastungsszenarien in einer Schlepprinne, in der das Anfahren und Aufstoppen eines Schiffes nachgebildet werden. Hierbei werden die sich daraus ergebenden Sohlenverformungen analysiert. Diese Arbeiten finden Ende Juni 2013 ihren Abschluss.

Für die Weiterführung der HN-Berechnungen mit der LBM werden Produktionsläufe gestartet, bei denen ein freier Nachlauf von 50 Rotordurchmessern garantiert ist. Zudem werden die Zeitreihen für die nachzurechnenden Naturuntersuchungen erstellt. Die Zwischenergebnisse zeigen, dass ein wesentlicher Schritt zur Implementierung des Rechenverfahrens im Deckwerksbemessungsprogramm GBBSOFT und somit zur Anwendung auf einem PC die weitergehende Rechenzeitreduktion ist. Da das LES-Verfahren sich derzeit zur Anwendung auf einem PC selbst unter Verwendung von GPUs als zu zeitaufwändig erweist, soll in weitergehenden Tests geprüft werden, inwieweit gröbere Rechengitter ohne eine unzulängliche Zunahme der numerischen Dispersion möglich sind, so dass für praktische Anwendungsfälle im Binnenverkehrswasserbau tolerierbare Rechenzeiten möglich werden.

## 5 Literatur

- [1] Krafczyk, M. (2010): Zwischenbericht zur Durchführung von HN-Berechnungen zur Untersuchung der Schraubenstrahlausbreitung hinter einem stationären Großmotorgüterschiff mit dem Lattice-Boltzmann-Verfahren. Consultant Computational Engineering. Braunschweig. 03.03.2010.
- [2] LWI (2010): Analyse der Kolkbildung infolge eines Schraubenstrahlgriffs – Zeitabhängige Berechnungen –. Leichtweiß-Institut für Wasserbau. Bericht Nr. 991.TU Braunschweig. April 2010
- [3] Spitzer, D. (2009): Untersuchungen zur Schraubenstrahlbelastung der Rheinsohle. BAW-Kolloquium „Verkehrswasserbauliche Untersuchungen am Rhein“. Karlsruhe. 08.10.2009.

**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 (W 4)**E-Mail:** bernhard.soehngen@baw.de**1 Problemstellung und Ziel**

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 in PJ 4.04 u. a. am Beispiel der Anpassungsoption „Fahrrinne in der Fahrrinne“ (FiF) die notwendigen Mindestfahrrinnenbreiten, und prüft, ob durch Reduzierung der Breite der Fahrrinne mit begrenztem Aufwand bei Niedrigwasser durchgängig eine größere, durchgängige Tiefe erreichbar ist.

**1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Technischer Standard bei der Fahrrinnendimensionierung ist derzeit die Nutzung kommerzieller Schiffsführungssimulatoren. Diese sind nach Ergebnissen des BAW-F&E-Vorhabens nur bei schwach eingeschränktem Fahrwasser aussagefähig. Wie die in der BAW entwickelten Standard-Trassierungsverfahren TRASSE und PeTra1D liefern sie nur obere Grenzwerte der erforderlichen Mindestabmessungen der Fahrrinne, da sie Querströmungen, leistungsfähige 4-Kanal-Bugstrahlruder oder Zwillingsruder hinter Düsenpropellern, wie sie bei einer adaptierten künftigen Flotte vorausgesetzt werden können, nicht berücksichtigen.

Das experimentelle fahrdynamische Modell PeTra2D, das die BAW zusammen mit der Universität Rostock (Dissertation Kolarov) entwickelt hat, kann den Verkehrsflächenbedarf im seitlich und tiefenmäßig begrenzten Fahrwasser genauer wiedergeben und wird in KLIWAS PJ 4.04 weiterentwickelt.

**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, 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 neu gegründeten WSD-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 abladebeschränkenden Tiefenengpass des Mittelrheins zwischen Mainz und St. Goar abzuleiten.

**2 Untersuchungsmethoden**

Die vorläufigen Fahrrinnenmindestbreiten wurden durch Simulation mit dem eindimensionalen fahrdynamischen Modell PeTra1D auf der Basis von Strömungsgeschwindigkeiten aus den hydrodynamischen Modellen CasCade (1D) und TELEMAC2D (2D) erstellt. Dieser Entwurf soll durch Simulationen mit verschiedenen Entwicklungsstufen des zweidimensionalen fahrdynamischen Modells PeTra2D mehrfach überarbeitet werden. Die geplanten Modellverbesserungen werden anhand von Daten aus Modellversuchen der DST Duisburg und aus Schiffseinmessungen, Schiffsführerbefragung, sowie

Fahrversuchen mit angemieteten Schiffen für eine Teststrecke bei Rüdesheim erarbeitet und kalibriert bzw. validiert.

Um Mindestbreiten anstelle der oberen Grenzwerte der Fahrrinnenbreite zu erhalten (vgl. Abschnitt 1.1), sollen der Routenplanungsalgorithmus und der Bahnführungsalgorithmus von ISYS eingebettet in Standard-Optimierungsverfahren den Verkehrsflächenbedarf wirklichkeitsnah abbilden. Der resultierende, optimierte Verkehrsflächenbedarf soll für den menschlichen, unvollkommenen Schiffsführer durch die objektive Bestimmung streckenabhängiger Sicherheitsabständen angepasst werden, indem in Zusammenarbeit mit dem ZfAM durch Stressmonitoring während Fahrversuchen auf dem Rhein und am Schiffsführungssimulator der Einflussfaktor Mensch (sog. „human factor“) durch zusätzliche Parameter in den Bahnführungsalgorithmus integriert wird.

### 3 Ergebnisse

Aus PeTra1D-Simulationen und den EPA-Naturuntersuchungen ergab sich ein erster Entwurf für eine optimierte Fahrrinne in dem betrachteten Abschnitt des Mittelrheins (Bild 1, FiF2). Die Modelldaten stimmen grundsätzlich mit den Beobachtungsdaten (Bild1, pink) überein und zeigen, dass es nach heutigem Wissensstand möglich sein könnte, einen Teil der bestehenden Fahrrinne (Bild 1, hellblau) auf etwa ein Drittel weniger Breite im Vergleich zur bestehenden Fahrrinne tiefer zu unterhalten, um bei vertretbarem Aufwand an Tiefenengpässen lokal mehr Tiefe im Fall von Niedrigwasser zur Verfügung zu stellen. Die für den Bergfahrer tiefenoptimierte FiF liegt nahezu vollständig innerhalb der bestehenden Fahrrinne.

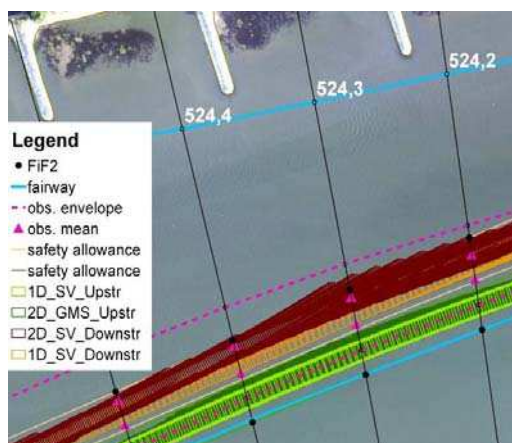


Bild 1: Ergebnisse aus PeTra1D- und PeTra2D-Berechnungen für den Rheinabschnitt stromab der Insel Ilmenau. Sie zeigen die Schleppfläche von Berg- (grün) und Talfahrern (orange), vorläufige Fahrrinnenmindestbreiten (FiF2) und EPA-Beobachtungen für Talfahrt.

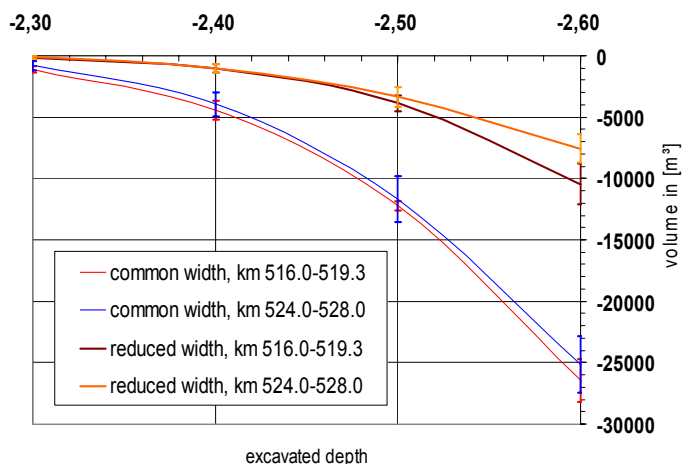


Bild 2: Berechnetes Volumen zwischen mittlerer Sohlage und gebräuchlicher Herstellungstiefe für verschiedene Fahrrinntiefen und Breiten (bestehende Fahrrinne: blaue und rote Linien, FiF2: orangefarbene und braune Linien), berechnet für zwei verschiedene Teststrecken an bestehenden Tiefenengpässen des Mittelrheins.

Ausgehend von obiger Entwurfsvariante wurden die zur Herstellung und Unterhaltung der Anpassungsoption „Fahrrinne in der Fahrrinne“ notwendigen Baggervolumina mit Hilfe bestehender Daten aus der Baggerdatenbank der WSV anhand der letzten 15 Jahre geschätzt. Die Herstellungsmengen der FiF2 sind in Bild 2 in Abhängigkeit der Baggertiefe dargestellt. Die sog. „Baggertiefe“ bezeichnet dabei die Fahrrinntiefe zzgl. 0.4 m Baggertoleranz und Vorratsbaggerung, d. h. eine Herstellungstiefe von 2.30 m entspricht der offiziellen Fahrrinntiefe von 1.90 m. Die Differenzen in den Baggervolumina sind bei unveränderter Fahrrinntiefe für beide Testabschnitte klein, wachsen mit zunehmender Herstellungstiefe auf voller Breite jedoch wesentlich stärker als auf eingeschränkter Breite.

Die FiF2-Lösung könnte die Herstellungskosten für eine Tieferunterhaltung demnach deutlich verringern. Aus den bisherigen Baggermengen und diesen geometrischen Herstellungstiefen wurden mit einem stark vereinfachenden Ansatz die jährlichen Unterhaltungsbaggerungen bei 0.2 m zusätzlicher Tiefe für die FiF2 (Herstellungstiefe von 2.5 m) auf zusätzlich etwa 28000 m<sup>3</sup> geschätzt. Bei Unterhaltung der ganzen bestehenden Fahrrinnenbreite um 0.2 m mehr als bisher ergibt sich etwa der dreifache Baggeraufwand. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Fahrrinnenunterhaltungsaufwand voraussichtlich wesentlich reduziert werden könnte, indem man eine geringere Fahrrinnenbreite wählt. Die Ergebnisse sind nach derzeitigem Wissenstand jedoch noch nicht vollständig belastbar.

Um den endgültigen Entwurf der FiF aus PeTra2D-Simulationen erstellen zu können, wurde ein umfangreiches Konzept für Naturuntersuchungen zur Validierung, Kalibrierung und Modellverbesserung erarbeitet.

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

Entsprechend der genannten Untersuchungsschwerpunkte werden bis Ende 2013 die folgenden Arbeitsschritte verfolgt:

- Umsetzung und Auswertung der Naturuntersuchungen zur Validierung, Kalibrierung und Modellverbesserung, voraussichtlich Mitte 2010 bis Ende 2012.
- Erweiterung des Routenplanungsalgorithmus auf 2D, und Implementierung von Routenplanungs- und Bahnführungsalgorithmus in eine Optimierungsumgebung mit den Optionen optimale Steuerung, praxisübliche Steuerung, Steuerung mit Fahrfehlern
- Modellverbesserungen in PeTra2D (Ruderkräfte bei geringem Flottwasser, Schlangelfahrt etc.)
- Entwicklung und Einbau eines „Mensch-Modells“ („Human Factor“)
- Durchführung der Modellrechnungen mit verbesserten Modellen in den Musterstrecken, Ermittlung der erf. Fahrrinnenbreiten und Ableitung von Anpassungsoptionen in Zusammenarbeit mit PJ 4.03
- Sensitivitätsbetrachtungen: Potenzial bessere Infosysteme, optimale Steuerung, flussangepasste Binnenschiffe.

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

**Netzplan-Nr.:** A39550110100

**Projektleiter:** Dr.-Ing. M. Pohl, Abteilung Geotechnik, 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. Dazu sind Messungen in der Natur erforderlich. Das Ziel ist, mit Hilfe numerischer Verfahren den Naturversuch zu simulieren und durch Anpassung der Randbedingungen an die Bedingungen anderer subaquatischer Ablagerungsstätten das zeitabhängige Setzungsverhalten von Schlickdeponien 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. Naturmessungen zum Setzungsverhalten und zur Porenwasserdruckentwicklung entsprechender Schlickdeponien haben erst in jüngster Zeit stattgefunden. Bis auf bei den von der BAW durchgeführten Langzeitmessungen sind die Messdaten nicht vollständig zugänglich.

Um das Verhalten des Schlicks im Naturversuch auf andere Schlickdeponien 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 müssen aus der Wasserstrasse verbracht und subaquatisch deponiert werden.

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 Schlickdeponien unter variablen Randbedingungen kann das Verbringungskonzept hinsichtlich der o.g. Punkte optimiert werden. Die zeitlich zunehmenden Standicherheiten der Schlickdeponien 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 Schlickdeponie sollen mit Hilfe eines numerischen Modells unter diversen Randbedingungen prognostizierbar sein.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Der Hamburger Rodewischhafen wurde im Jahr 1993 zur Nutzung als Zwischenlager mit Baggergut (Schlick) verfüllt. Von der BAW wurde dort unmittelbar nach der Unterwasserablagerung des Schlicks eine Messanlage für Setzungs- und Porenwasserdruckmessungen installiert (Bild 1). Diese Messanlage wurde im Jahr 2000 modernisiert und neu kalibriert.



Nach Änderung der Nutzungsgenehmigung des Zwischenlagers Rodewischhafen in ein Endlager wurde der Schlick im April 2004 mit Sand abgedeckt und somit eine Hafenerweiterungsfläche geschaffen. Damit besteht die Möglichkeit, unter weiterer Verwendung der bestehenden Messanlage, das Konsolidationsverhalten einer Schlickdeponie unter hohen Zusatzbelastungen bis ca. 150 kN/m<sup>2</sup> im Naturversuch zu beobachten.

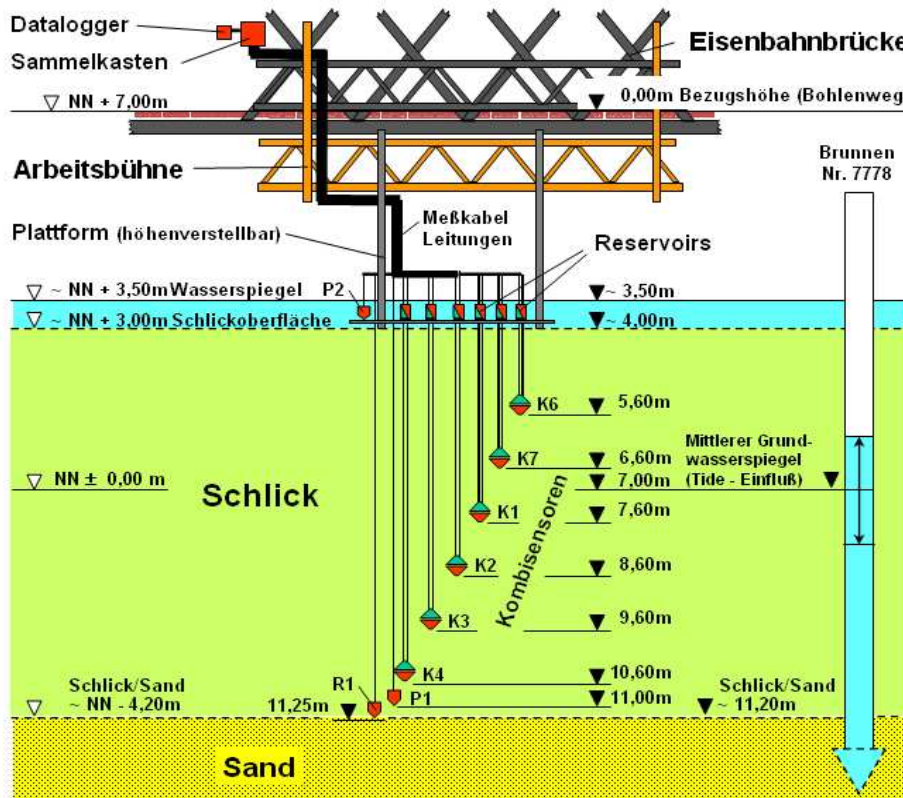


Bild 1: Messanlage Rodewischhafen zu Beginn der Messungen 1994

Ergänzende Labor- und Feldversuche wurden an frischen Schlickproben aus vergleichbaren Revieren durchgeführt, um die bodenmechanischen Eigenschaften eingrenzen zu können. Aus zeitlichen Gründen, aufgrund der regulären Projektbearbeitung, wurde im Sept. 2008 das Forschungsvorhaben an die Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Lehrstuhl für Gebirgs- und Felsmechanik/Felsbau vergeben.

Auf Grundlage des Naturversuchs wurde ein numerisches Rechenmodell erstellt, das an den Messergebnissen aus dem Naturversuch und den Laborversuchen zu kalibrieren ist. Wegen der großen Verformungen und der rheologischen Eigenschaften des Schlicks wird ein Finite-Differenzen-Programm (FLAC3D) mit einem nichtlinearen Stoffgesetz unter Berücksichtigung der spannungsabhängigen Durchlässigkeit mittels eines isotropen Darcy-Gesetzes verwendet.

### 3 Ergebnisse

Die bisherigen Messergebnisse aus dem Naturversuch erlauben eine Beurteilung des Konsolidationsverhaltens von Schlick unter Eigengewichtsbedingungen und zusätzlicher Auflastspannung. Die Messdaten von 1994 bis 2005 wurden zusammenfassend ausgewertet und in Graphiken für die zeitlichen Setzungen (Bild 2) und Porenwasserdrücke dargestellt.

Zur Nachrechnung der Laborversuche wurden verschiedene Stoffgesetze angewandt. Hierbei stellte sich das double-yield-model mit einer Volumen- und Scherverfestigung als das geeignete heraus (Bild 3). Zur Erzielung von verträglichen Rechenzeiten wird bei der Simulation der Kompressionsmodul des

Wassers in definierten Zeitschritten verringert. Der Wert des reduzierten Kompressionsbeiwertes und die Anzahl der Zeitschritte wurden verifiziert, um nur eine geringe Abweichung vom wahren Zeit-Setzungsverhalten zu erlauben. Für die Erzielung einer quantitativen Übereinstimmung sind die Stoffparameter und Randbedingungen hinsichtlich des Baggerguts beim Einbau weitergehend zu untersuchen.

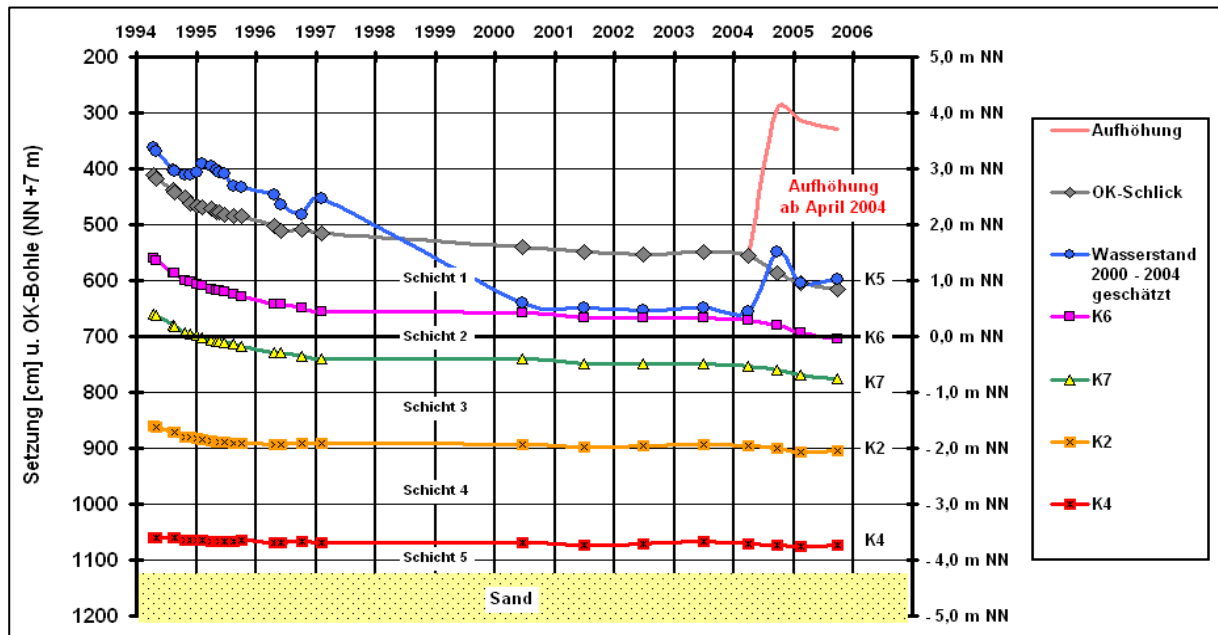


Bild 2: Setzungen von 1994 bis 2005

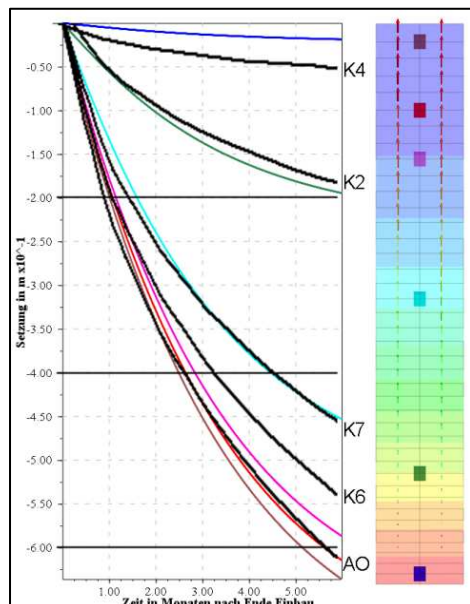
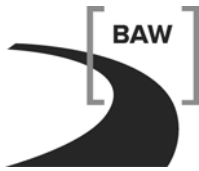


Bild 3: numerisches Simulationsergebnis der Zeit-Setzungen unter Eigengewicht (6 Monate nach Messbeginn)



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

2010: Kalibrierung der Eingabeparameter der Stoffgesetze anhand der Messdaten vom Großversuch (unter Eigenkonsolidation)  
Dreidimensionale Simulation des Großversuchs mit Sandauflast inkl. Geotextilien, Ringdrainage und Vertikaldräns.

Bearbeitungszeitraum: bis Ende 2010

## **Bemessung korrodierter Stahlspundwände im Wasserbau**

**Netzplan-Nr.:** A39550110158

**Projektleiterin:** Dipl.-Geol. A. Heeling (Mitarbeiterin: Dipl.-Ing. (FH) A. Jakobs), Abteilung Geotechnik, 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. Das Referat Geotechnik Küste 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 sind nach den Bemessungsverfahren der EAU 2004 zukünftig „schlankere“, statisch höher ausgelastete Spundwandprofile zu erwarten, so dass eine Verminderung der Tragfähigkeit aufgrund korrosiver Wanddickenverluste von größerer 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 (= WandDickenMessung).

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 Maximalen 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. Die Untersuchungsmethoden wurden detailliert im Endbericht (European Communities, 2007) beschrieben.

Die WaDiMe-Programme wurden zwischen 2007 und 2009 weiterentwickelt. Die Programmierarbeiten wurden von der Fa. Skill Networks, Hamburg, durchgeführt.

In Zusammenarbeit mit der Fa. Applus RTD, Bochum, wurden Wanddicken-Vergleichsmessungen mittels Ultraschall und pulsierendem Wirbelstrom im Labor (2006) und Vorort (2007 und 2008) durchgeführt.

In Zusammenarbeit mit der Fa. Evologics, Berlin, erfolgten 2009 erste Vergleichsmessungen im Labor zur Beurteilung der Aussagekraft und Praxistauglichkeit des Ultrabreitbandsonar-Verfahrens. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt nach den Aussagen der Fa. Evologics im – im Vergleich zur Ultraschallmessung – geringeren Aufwand, da nur eine grobe Reinigung der Messstellen erforderlich ist, bei gleichzeitig höherer Messgenauigkeit.

## 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 „anormalen“ 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, sowie im September 2007 auf dem HTG-Kongress in Dresden vorgestellt.

2008 wurde das WaDiMe-Programmpaket vollständig überarbeitet und benutzerfreundlicher gestaltet. 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 Vorort-Vergleichsmessungen 2007 aber zu widersprüchlichen Ergebnissen führten, ergab eine erneute Messkampagne 2008, dass die Messungengenauigkeit des Incotest-Verfahrens unter realen Einsatzbedingungen so groß ist, dass keine aussagekräftigen Ergebnisse erzielt werden können.

Ohne eine Weiterentwicklung des Wirbelstromverfahrens sind deshalb keine weiteren Vergleichsmessungen geplant.

Erste 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 (s. Bild 1).

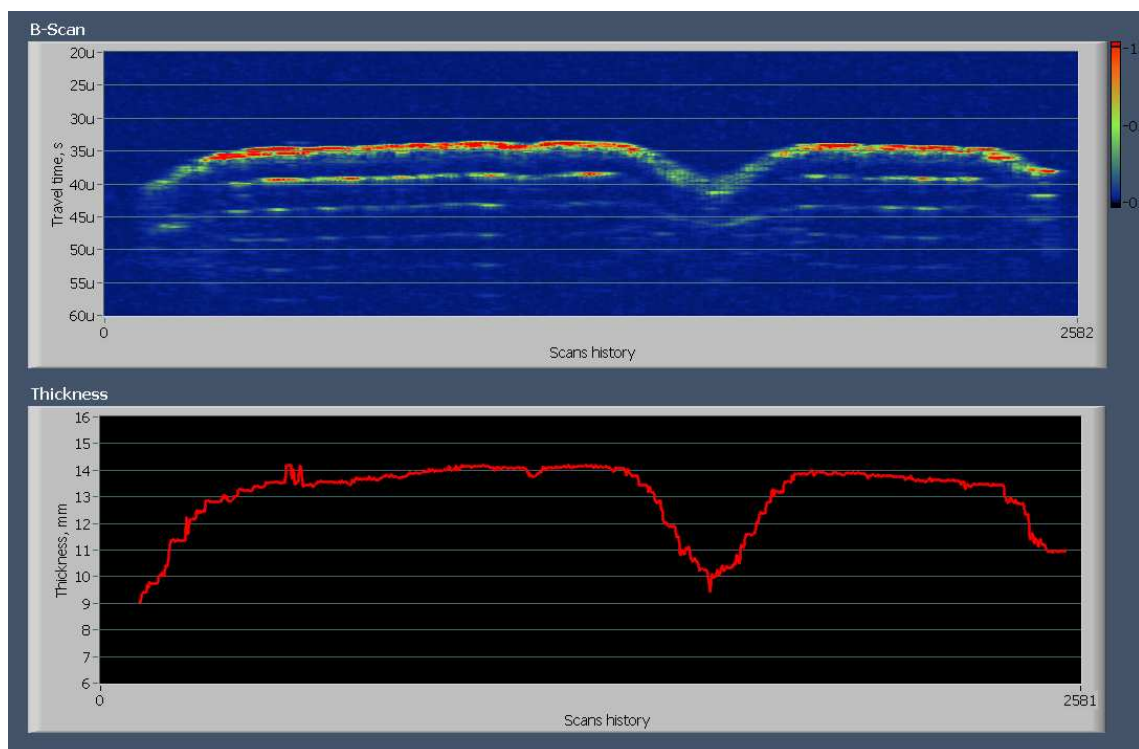
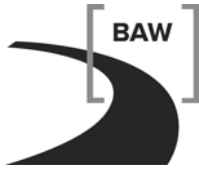


Bild 1: Ergebnis der Abtastung eines Spundwandteststückes mittels Ultrabreitbandsonar (Fa. Evologics)

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Es ist geplant,

- das modifizierte Berechnungsverfahren zur Abschätzung der charakteristischen Werte der Korrosion aus den gemessenen Restwanddicken sowie
- das Prognosemodell zur Abschätzung der charakteristischen Werte der Korrosion aus Milieuparametern



in WaDiMe zu implementieren und zu dokumentieren.

Weiterhin ist geplant, eine detaillierte Beschreibung zur fachgerechten Durchführung und Auswertung von Ultraschall-Messungen zu erarbeiten, die zukünftig der WSV als Ausschreibungsgrundlage für Wanddickenmessungen an Dritte zur Verfügung gestellt werden kann.

Alternative Verfahren zur Spundwanddickenmessung sind auf ihre Praxistauglichkeit hin zu prüfen und zu bewerten.

Bearbeitungszeitraum: 10/2001 bis 12/2010

## **5 Literatur**

- [1] 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.

## **Deckwerksanalyse mit der Distinkt Element Method (DEM)**

**Netzplan-Nr.:** A39550170270

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

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

### **1 Problemstellung und Ziel**

Kenntnisse über Schädigungsmechanismen und Widerstände des Deckwerks gegenüber hydraulischen Belastungen sind für eine wirtschaftliche Bemessung von Deckwerken in der WSV unverzichtbar. 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.

#### **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 (2004), EAK (1993 u. 2002)). Durch kleinmaßstäbliche Modellversuche und Beobachtungen in der Natur wird auf die Widerstandsfähigkeit des Deckwerks gegenüber den hydraulischen Einwirkungen geschlossen.

Eine Zusammenführung von Einwirkungen und Widerständen erfolgt derzeit auf Grundlage der Finite Elemente Methode (FEM). Hierbei kann jedoch nur eine Massenbetrachtung angestellt werden, da hiermit keine lokalen Bewegungen abgebildet werden können. 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. Abgewandelt wird die DEM gerade im Wasserbau als Smooth Particle Hydraulics (SPH) eingeführt.

Deckwerksschäden und die verursachenden Mechanismen werden mitunter aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet und bewertet (AK17 (2006), Schuppener (2007)). Eine Simulation von Deckwerksschäden hat aus den vorgenannten Gründen bisher nicht stattgefunden. Durch numerische Simulationen auf Grundlage der DEM können beobachtete Schäden in der Natur auf deren verursachende Schädigungsmechanismen zurückgeführt werden.

#### **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 Buhnen 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, Windwellen, Schiffswellen), Bodenaufbau, Filtermaterial, Deckwerksteine (Form, Größe, Masse) und Deckwerksdicke, kann eine ausreichende Stabilität des Deckwerks bestimmt werden und somit eine individuelle Bemessung erfolgen. Aufgetretene Schäden können durch die numerischen Simulationen auf verursachende Mechanismen zurückgeführt werden. Die Ursachen können benannt und ihnen entgegengewirkt werden.



### 1.3 Untersuchungsziel

Die hydraulischen Belastungen sollen den Widerständen des Deckwerks für die jeweiligen lokalen unterschiedlichen Randbedingungen gegenübergestellt werden und somit letztendlich eine Dimensionierung des Deckwerks mittels Parametervariation ermöglichen. Schädigungsmechanismen sollen auf Grundlage der Simulationen für reale Schadensbilder hergeleitet und die verursachenden Wirkungen benannt werden.

### 2 Untersuchungsmethoden

Die Deckwerkssteine können in ihrer Form, Größe und Masse mit der DEM in drei Dimensionen (hier als Particle Flow Code (PFC3D)) weitgehend realistisch abgebildet werden (Bild 1). Durch die dreidimensionale Betrachtung werden alle Freiheitsgrade der Deckwerkssteine wirklichkeitsnah simuliert. Der Einfluss des Wassers (Wellen und Strömung) werden mit einem CCFD Add-on (Coupled Computational Fluid Dynamics) erfasst.

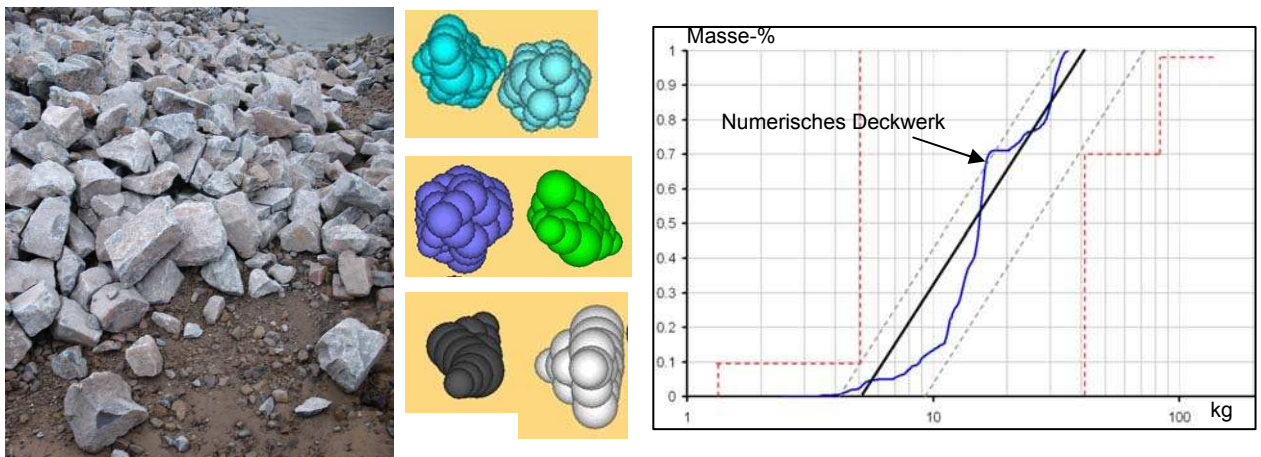


Bild 1: reale und numerische Deckwerkssteine (Beispiel), Summenkurve LMB<sub>5/40</sub>

Der unterlagernde Boden und der Filter werden als dreidimensionales Kontinuum mit der Finiten-Differenzen-Methode (hier: FLAC3D) simuliert, um die Interaktion Wasser - Deckwerk - Filter - unterlagernder Boden - Porenwasser erfassen zu können. Durch die Simulation des Bodens als Kontinuum wird die Rechenzeit stark reduziert, da lediglich vergleichsweise große Partikel für die Deckwerkssteine erforderlich sind. Partikel auf Sand- / Kies Korngröße sind als Kontinuum abgebildet. Die Programme PFC3D, FLAC3D und CCFD werden miteinander gekoppelt.

Die numerischen Ergebnisse werden an Beobachtungen in der Natur und Erfahrungswerten (von den Referaten K1, K2, G4 und W4) plausibilisiert und validiert. Aus zeitlichen Gründen, aufgrund der regulären Projektbearbeitung, wurde im Sept. 2008 das Forschungsvorhaben an die Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Lehrstuhl für Gebirgs- und Felsmechanik/Felsbau vergeben.

### 3 Ergebnisse

Von der TU Freiberg wurden Generierungsalgorithmen für die realistische Abbildung der Bandbreite von Deckwerksteingeometrien mit dem PFC3D entwickelt (Bild 1). Bei der derzeitigen Generierung der Deckwerksteingeometrien werden – ausgehend von einer Ausgangskugel – in 6 oder 14 Raumrichtungen eine vorgegebene Anzahl von Kugeln aneinandergereiht. Der Radius der neuen Kugeln ist eine Zufallszahl aus einem vorgegebenen Intervall. Insgesamt werden sechs Parameter variiert (Anzahl der Raumrichtungen, Wahrscheinlichkeit einer Richtung, Anzahl Kugeln je Richtung, Anzahl Füllkugeln, Stärke der Radienverringern, Herausragen von Kugeln) und somit eine Vielfalt von Partikelgeometrien ermöglicht. Für eine realistische Abbildung von Deckwerksteinen und deren Massenverteilung wurden die maßgebenden Parameter ermittelt (Bild 1). Zur Verringerung der Rechenzeiten werden in den nachfolgenden Simulationen jedoch vereinfachte Geometrien verwendet (Bild 2).

Die Kopplung von PFC3D mit CCFD wurde durchgeführt und auf Plausibilität geprüft. Mit dem CCFD wurden Wellen (Bild 2) und das Leerlaufen eines Kanals simuliert. Diese Belastungen wurden anschließend auf ein Deckwerk, bestehend aus PFC3D-Steinen aufgebracht, bei denen die resultierenden Kräfte, Geschwindigkeiten und Verschiebungen aufgezeichnet bzw. visualisiert wurden (Bild 3). Die Simulation von Grundwasserpotentialen im unterlagernden Boden wird derzeit mit FLAC3D durchgeführt. Die am Deckwerk wirkenden Kräfte werden nachfolgend in PFC3D eingelesen und auf die Deckwerksteine aufgebracht. Die Kopplung aller drei Programme würde derzeit in unzumutbar langen Rechenzeiten resultieren.

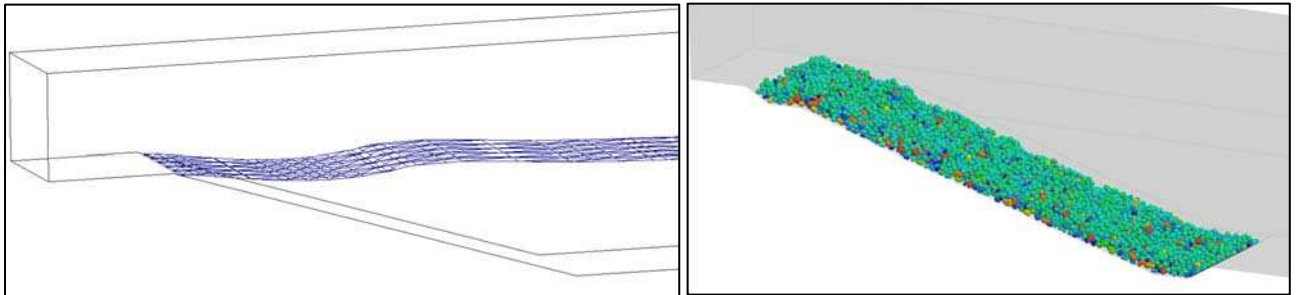


Bild 2: Welle im CCFD (links), Deckwerk im PFC3D (rechts)

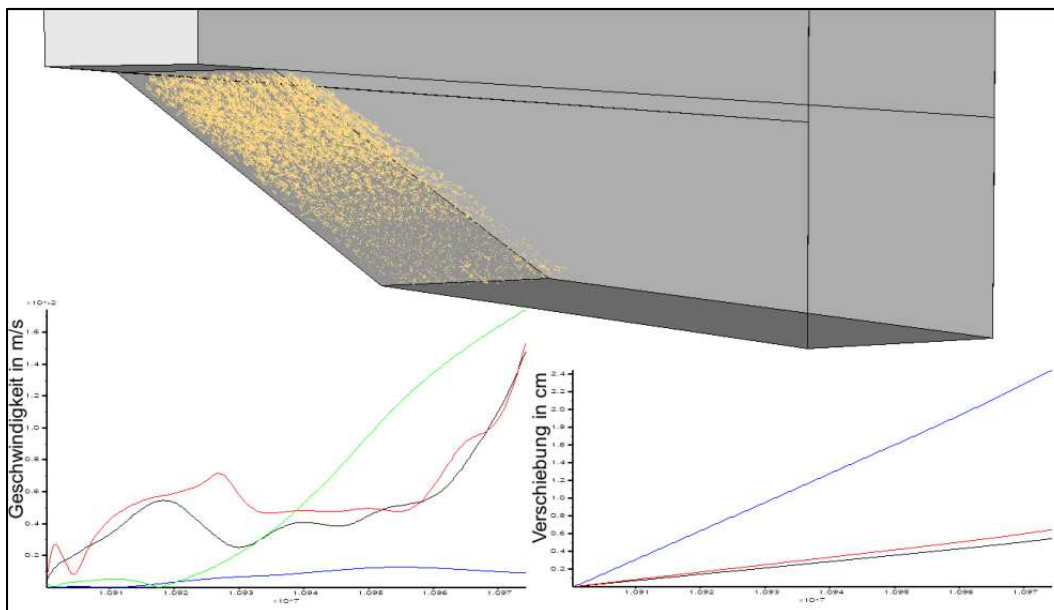


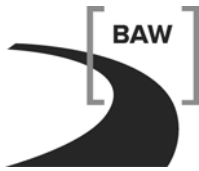
Bild 3: Fließvektoren im Deckwerk (oben) und Reaktion einzelner Deckwerksteine beim Leerlaufen des Kanals

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2010: Numerische Simulation eines Deckwerks an der Tideems. Als hydraulische Einwirkungen werden physikalisch gemessene Größen eingespielt. Maßgebliche Belastungsgröße im zu simulierenden Bereich ist die Strömungsgeschwindigkeit. Die Simulationsergebnisse eines Deckwerks bestehend aus Wasserbausteinen der Klasse LMB<sub>5/40</sub> werden mit denen einer Klasse LMB<sub>10/60</sub> (Dichte = 2,65 g/cm<sup>3</sup>) auf einer 1:3 geneigten Böschung gegenübergestellt. Der unterlagernde Boden und der Mineralkornfilter werden nicht simuliert.

Realitätsnahe Simulation von Schiffs- und Windwellen.

Simulation der sich bildenden Porenwasserüberdrücke im anstehenden Boden infolge der hydraulischen Belastungen mit FLAC3D und Übergabe der Randbedingungen an PFC3D.



- 2011: Simulation eines Deckwerks der WSV im Tidegebiet mit Belastungen aus Tideschwankungen (Grundwasserpotentiale, Strömung), Schiffswellen, Sturmfluten.  
Simulation einer überströmten Buhne im Tidegebiet.
- 2012: Durch Parametervariationen und Programmerweiterungen werden die optimalen Deckwerksteinformen,-größen,-massen,-verteilungen, Deckschichtdicken, Fußstützungsarten und die Arten des Deckwerkbaus für charakteristische Randbedingungen ermittelt.  
Simulation von teilverklammerten und gesetzten Deckwerken.  
Bearbeitungszeitraum: bis Ende 2012.

**Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiffahrtsstraße - Schiffsdynamik****Netzplan-Nr.:** A39550210055**Projektleiter:** Dr.-Ing. K. Uliczka, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Ästuarsysteme I (K2)**E-Mail:** klemens.uliczka@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. Die drei Teilprojekte sind aufgrund der Wechselwirkung der auftretenden physikalischen Prozesse eng miteinander verknüpft und bauen auf den jeweils in den anderen Teilprojekten erarbeiteten Ergebnissen auf. Das aus dem Forschungsprojekt WSS entwickelte Teilprojekt Schiffsdynamik hat das Ziel, 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 neigungsabhängige Querkräfte und Giermomente infolge des Bank-Effekts) zu erarbeiten. Die jeweils parallel mit zu erfassenden schiffserzeugten Wasserspiegelauslenkungen (Schiffswellen) und Strömungen ermöglichen eine ganzheitliche Betrachtung der physikalischen Prozesse bei der Revierfahrt eines großen Fahrzeugs.

Aufgrund von Forschungsergebnissen zur Schiffsdynamik großer Containerschiffe auf Seeschiffahrtsstraßen empfahl die BAW der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV), hier im Besonderen den für die Seeschiffahrt zuständigen Wasser- und Schifffahrtsdirektionen NORD und NORDWEST, die Kenntnis der Fahrdynamik großer tiefgangsrelevanter Containerschiffe bei Revierfahrt als ständige Fachaufgabe in der WSV zu betrachten [1]. Veranlassung war die Verbesserung der Kenntnisse des dynamischen Fahrverhaltens bei Revierfahrt (Squat und Trimm) der schon heute und zukünftig auf den Seeschiffahrtsstraßen verkehrenden Containerschiffe, um hieraus eine weitere Optimierung der Befahrbarkeit und eine wirtschaftlichere Ausnutzung der Seehafenzufahrten zu erreichen. 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. Für die Definition von standardisierten Versuchsserien zur Bestimmung von Squat und Trimm in Maßstabsmodellen wurde auf die Erfahrungen der BAW, Dienststelle Hamburg, zurückgegriffen (u. a. [2]). Des Weiteren sind derzeit validierte und international anerkannte hydrodynamisch-numerische RANSE-Verfahren als gleichwertig zum Modellversuch zur abgesicherten Bearbeitung der Aufgabenstellung anzusehen. Potentialtheoretische Verfahren sind für derartige Fragestellungen in Entwicklung, aber derzeit noch nicht hinreichend validiert.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Aufgrund der Größenentwicklung der Containerschiffahrt (Inbetriebnahme von 14.000 TEU-Containerschiffen in 2010) und der begrenzten Ausbaupazität der Seeschiffahrtsstraßen wird zukünftig deren Befahrbarkeitsanalyse für eine optimale Nutzung durch die Schifffahrt eine wachsende Bedeutung hinsichtlich der Schiffsdynamik, aber auch bezüglich der wirtschaftlichen Unterhaltung der Schifffahrtsstraßen (z.B. schiffserzeugte Belastungen der Ufer) bekommen. Eine detaillierte Kenntnis u. a. der Schiffsdynamik (Squat, Trimm und Bank-Effekt) der zukünftig in der 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.

Die schiffsspezifischen Squat- und Trimmwerte, Querkräfte und Giermomente sind 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

Anhand von Messdaten aus der Natur und der in hydraulischen Maßstabsmodellen erfassten Daten werden für verschiedene Schiffe vorhandene numerische Verfahren (RANSE und potentialtheoretische Verfahren) validiert und, falls erforderlich, im Rahmen des Teilprojekts Mathematische Verfahren weiterentwickelt. Darüber hinaus können anhand der Messdaten Quantifizierungen der Berechnungsunsicherheiten sowie Empfehlungen hinsichtlich der Nutzung der Verfahren vorgenommen werden.

Im Rahmen des Forschungsbereichs Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiffahrtsstraße wurden Validierungsdaten für die Weiterentwicklung numerischer Verfahren aufbereitet. Die Validierung verschiedener hydrodynamisch-numerischer Prognoseverfahren wurde an eine renommierte, international anerkannte Institution mit spezieller Fachkenntnis zur Schiffshydrodynamik vergeben. Wegen der hohen fachlichen Qualifikation und entsprechender Fachausstattung in der numerischen Simulation (Abteilung Fluidodynamik) sowie der umfangreichen Wissensbasis über die Vielfalt der Schiffsentwürfe (hohe Anzahl von weltweiten über 6.600 Schiffsklassifizierungen) kam für eine fachgerechte Bearbeitung im nationalen Bereich nur die Klassifizierungsgesellschaft Germanischer Lloyd AG (GL), Hamburg zusammen mit ihrer Tochterfirma FutureShip, Potsdam in Betracht.

### 3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der umfangreichen Untersuchungen der Germanischen Lloyd AG zur Validierung hydrodynamisch-numerischer Berechnungsverfahren wurden im Bericht „Zur Validierung numerischer Verfahren zur Vorhersage des Squat großer Frachtschiffe in Revierfahrt“ aufbereitet und bewertet [3]. Über den beauftragten Umfang der Untersuchungen wurden in eigener FuE-Leistung weitergehende Berechnungen mit den bekannten Modellverfahren (Stationäre bzw. instationäre Slender-Body-Methoden) vorgenommen, für die eine Nichteignung für Seereviere bestätigt wurde.

Das Gesamtergebnis dieses FuE-Projekts mit dem GL zeigte den derzeitigen Stand der Technik und Wissenschaft der hydrodynamisch-numerischen Berechnungsverfahren zu Fragen der Schiffsdynamik bei Revierfahrt:

- Programme, die auf der Potentialtheorie basieren, sind nach heutigem Stand nicht in der Lage, das fahrdynamische Verhalten großer Fahrzeuge (Squat und Trimm) bei Revierfahrt zu beschreiben. Diese Verfahren können somit derzeit für die Belange der WSV nicht weiterempfohlen werden.
- RANSE-Verfahren sind prinzipiell geeignet, Squat und Trimm in der richtigen Größenordnung zu berechnen, doch müssen derzeit noch Vereinfachungen u. a. in der Unterwasserbathymetrie (wie in der Regel auch beim physikalischen Modellversuch) hingenommen werden. Die Validierung der RANSE-Verfahren zum mittleren Squat sind für alle Fahrzeuge hervorragend. Die Genauigkeit hinsichtlich maximalem Squat liegt für moderne Containerschiffe in der Größenordnung etwa eines Dezimeters ( $\leq 1$  dm) infolge einer größeren Unschärfe bei der Berechnung des Trimm. Instationäre Vorgänge (Beschleunigung, Fahrtreduzierung) sind derzeit auch mit dieser Methode nicht nachvollziehbar. Bei Massengutschiffen liegen die Abweichungen von den Modellmessungen im Bereich von etwa zwei Dezimetern ( $\leq 2$  dm), das Trimmverhalten war rechnerisch nicht validierbar. Derzeit sind die RANSE-Verfahren nur von Fachleuten aus der Numerik einsetzbar.

Für die WSV kann aus dem Projektergebnis die Erkenntnis abgeleitet werden, dass für die Zulassung eines jeden AGFs ein Einzelfallnachweis gefordert werden muss. Dieser kann entweder in Form von geeigneten Schleppversuchen im Flachwasserkanal oder mit numerischen Berechnungen basierend auf RANSE-Verfahren erfolgen. Eine Übertragung des Squatverhaltens von einem bereits untersuchten Schiff ist weder auf ein geometrisch ähnliches, dabei unterschiedlich großes Schiff, noch auf ein größenmäßig ähnliches, aber geometrisch unterschiedliches Schiff möglich. Das Entwicklungskonzept, ein schnell rechnendes Programm auf Basis von Übertragungsfunktionen RANSE/Potentiallöser zu erstellen, konnte trotz Einbeziehung anerkannter Experten des GL im vorgesehenen Zeitrahmen nicht verwirklicht werden.

Die einzige Möglichkeit nach Stand von Technik und Wissenschaft ist somit, mit rechnerisch und zeitlich aufwändigen, hochauflösenden, reibungsbehafteten RANSE-Modellen das fahrdynamische Verhalten der Fahrzeuge für geometrisch einfache Querschnitte berechnen zu lassen und die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Genauigkeitsspanne für die Belange der WSV zu bewerten.

Weitere Entwicklungsschritte mit einem zweiten potentialtheoretischen Verfahren der GL-Tochter FutureShip, dem Modellverfahren FS-Flow [4], welches u. a. lokale Grenzschichtaufdickungen zwischen Schiff und Sohle sowie den Propellersog mittels Senke/Quelle-Scheibe berücksichtigte, zeigten für Passagen des großen Containerschiffs in dem untersuchten Trapezquerschnitt mit  $n = 20$  eine deutliche Annäherung der Rechenergebnisse an die Validierungsdaten aus dem hydraulischen Maßstabsmodell (Bild 1). Es ist vorgesehen, weitere Entwicklungsschritte dieses (schnell rechnenden) potentialtheoretischen Verfahrens in Sinne einer Verwendung für die Belange der WSV zu unterstützen.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

In dem WSS-Teilprojekt Schiffsdynamik ist im Wesentlichen die Methode des physikalischen Maßstabsversuch nach Stand von Technik und Wissenschaft einzusetzen, um zum einen fahrdynamische Daten für die großen Fahrzeuge zu ermitteln, zum anderen Basisdaten für die Schiffsführungssimulation sowie Validierungsdaten für die Weiterentwicklung mathematischer Verfahren bereitzustellen. Die Ergebnisse der Maßstabsversuche sind durch Messungen in der Natur abzusichern. Die Verwendung der Untersuchungsergebnisse dieses Teilprojekts verdeutlicht die enge Verknüpfung der o. a. drei Teilprojekte Schiffsdynamik, Mathematische Verfahren und Schiffsführungssimulation im Forschungsgebiet WSS.

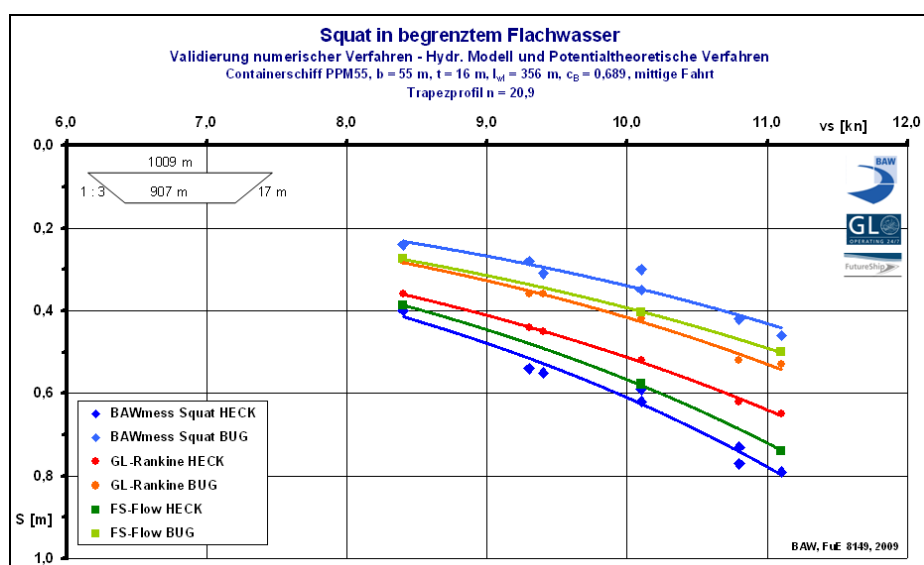


Bild 1: Vergleich von Berechnungsergebnissen aus potentialtheoretischen Verfahren mit den Validierungsdaten aus dem hydraulischen Modell der BAW.

Das Vorhaben soll voraussichtlich in 2012 beendet werden.

## 5 Literatur

- [1] Uliczka, K.; Wezel, M.: Dynamisches Fahrverhalten großer Containerschiffe bei Revierfahrt auf der Unter- und Außenelbe, Tagungsband HTG-Kongress 2005, Hamburg (2005)
- [2] Uliczka, K.; Kondziella, B.: Dynamisches Fahrverhalten sehr großer Containerschiffe unter extremen Flachwasserbedingungen, Deutsche Beiträge, 31. Internationaler Schifffahrtskongress Estoril / Portugal, Bonn 2006
- [3] GL AG: Validierung numerischer Verfahren zur Vorhersage des Squat großer Frachtschiffe in Revierfahrt – Abschlussbericht, Abteilung Fluid Dynamics/NB-EF, Bericht Nr. NB-EF 2009.070, Hamburg 2009 (unveröffentlicht)
- [4] FutureShip: Computation of the squat effect by FS-Flow for the PPM55 container carrier in shallow and confined water, Report, FutureShip GmbH–A GL Company, Potsdam 2009



## **MudSim: Numerische Simulation der Dynamik von Flüssigschlick (MudSim-B)**

**Netzplan-Nr.:** A39550210093

**Projektleiterin:** Dipl.-Ing. D. Knoch, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)

**E-Mail:** denise.knoch@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

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

In vielen Bereichen der Deutschen Küste führt eine zunehmende Verschlickung von Häfen, Hafenzufahrten und Teilabschnitten der Ästuar zu hohen Unterhaltungskosten. Besonders in strömungsberuhigten Zonen akkumuliert der Schlick und konsolidiert letztendlich. Diese konsolidierten Schlickschichten sind nur mit hohem Aufwand zu mobilisieren oder abzutragen.



Fragestellungen des Suspensionstransports werden mit hydrodynamischen numerischen Modellverfahren untersucht. Die derzeit etablierten und erprobten Modellverfahren sind jedoch kaum in der Lage die Dynamik von Flüssigschlick (fluid mud, hochkonzentrierte Schlicksuspension) zu simulieren. Dies begründet sich in den besonderen rheologischen Eigenschaften von Flüssigschlick. Das Fließverhalten von Flüssigschlick entspricht nicht einem Newtonschen Fluid, wie Klarwasser. Jedoch basieren die hydrodynamischen numerischen Modelle in der Regel auf diesem Ansatz.

In diesem Forschungsprojekt soll daher ein bestehendes und bewährtes hydrodynamisches Modellverfahren für die Simulation von Flüssigschlick erweitert werden.

Das MudSim-Projekt ist eine Kooperation zwischen Prof. Dr.-Ing. A. Malcherek der Universität der Bundeswehr München mit dem Projektschwerpunkt *Rheologische Untersuchungen und Parametrisierungen* (MudSim-A) und der BAW – Abteilung Wasserbau im Küstenbereich – mit dem Projektschwerpunkt *Weiterentwicklung eines isopyknischen Modellverfahrens* (MudSim-B). Das MudSim-Projekt wird über das KFKI (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen) gefördert.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Mit Hilfe des Verfahrens MudSim sollen zukünftig erforderliche Maßnahmen auch in ihrer Wirkung auf Schlicktransport und Schlickakkumulation untersucht werden können, um Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen im Hinblick auf die Minimierung dieser Prozesse ausrichten zu können. Zudem sollen hiermit bestehende und zukünftige Managementstrategien zur Umlagerung und Unterbringung hochkonzentrierter Schlicksuspensionen und konsolidierter Schlicke verbessert werden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Die numerische Simulation von hochkonzentrierten Schlicksuspensionen soll für ortsspezifische komplexe Ästuarmodelle ermöglicht werden. Ein geeignetes mathematisches Modellverfahren ist für die spezifischen rheologischen Eigenschaften und für die grundlegenden Transportprozesse von Flüssigschlick weiterzuentwickeln.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Grundlegend für die Entwicklung neuer Methoden zur numerischen Simulation von Flüssigschlick sind die Erforschung rheologischer Eigenschaften und die Bestimmung der charakterisierenden Parameter zur Beschreibung von Flüssigschlick.



Einer der wichtigsten charakterisierenden Parameter für das Verhalten von Flüssigschllick ist der Feststoffgehalt, bzw. die dazu proportionale Dichte. Dieser Parameter wird für die numerische Modellierung genutzt, indem der Wasserkörper und die Schlicksuspension in Schichten gleicher Dichte unter Annahme einer stabilen Schichtung unterteilt werden (siehe Bild 1). Diese Schichten gleicher Dichte, Isopyknen, bilden die vertikale Diskretisierung im Modell. Jeder Isopykne wird ein bestimmtes rheologisches Verhalten (Newtonsches, nicht-Newtonsches Fluid) zugeordnet (siehe Bild 2).

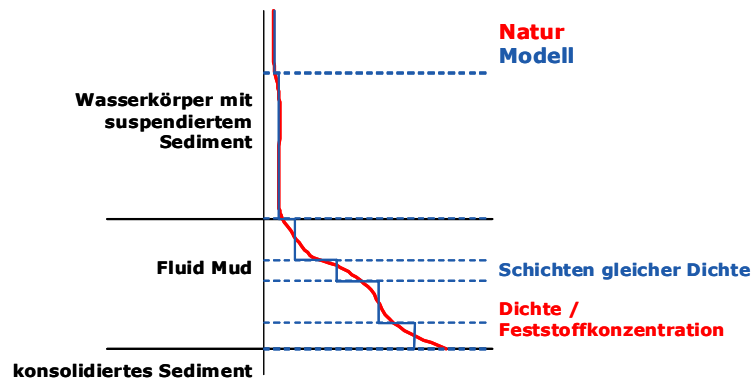


Bild 1: Schematische Darstellung der Dichteapproximation.

Die Entwicklung des MudSim-Modells basiert auf einem hydrodynamischen isopyknischen Modell, welches von Prof. Dr. V. Casulli der Universität Trient, Italien, zur Verfügung gestellt wurde. Der konzeptionelle isopyknische Modellansatz ist besonders für die Modellierung stark geschichteter Strömungen geeignet.

Das isopyknische Modell ist um die entscheidenden Transportprozesse wie Deposition, Konsolidierung, Entrainment und Fluidisierung sowie um rheologische Ansätze für Schlicksuspensionen zu erweitern (siehe Bild 2).

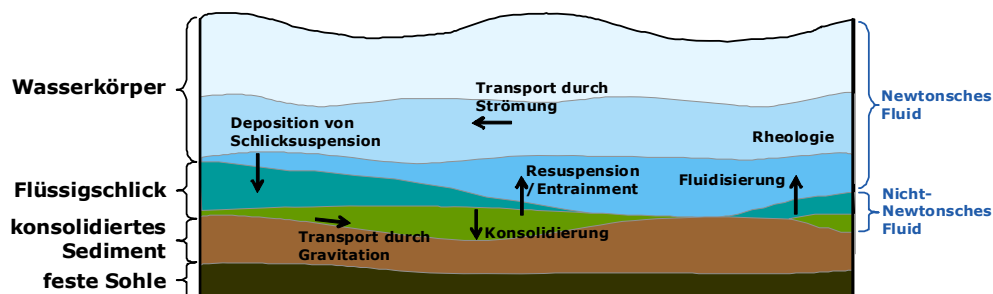


Bild 2: Schematische Darstellung der wesentlichen physikalischen Prozesse der Dynamik von Flüssigschllick.

### 3 Ergebnisse

Die Rheologie von Flüssigschllick wird über den Spannungstensor im Modell realisiert. Durch rheometrische Laboruntersuchungen werden Zusammenhänge von Schubspannung und Scherrate sowie Viskosität und Scherrate in Abhängigkeit von der Suspensionskonzentration ermittelt. Diese Zusammenhänge gehen über eine scheinbare Viskosität im numerischen Modell ein.

Eine zusätzliche Weiterentwicklung für das isopyknische numerische Modell ist der Massenaustausch zwischen den Dichteschichten (Isopyknen), der die Simulation von vertikalen Transportprozessen von Flüssigschllick ermöglicht.

Beim Massenaustausch ist ein Volumen- und Massenerhalt im System zu gewährleisten. Hierzu ist ein Konzept entwickelt worden, welches mindestens drei Dichteschichten zur Berücksichtigung von Massen- und Ausgleichsströmungen erfordert (siehe Bild 3).

Verschiedene Verifikationsbeispiele wurden mit diesem Modell gerechnet, wie das Prinzipbeispiel Sedimentation in einer Absetzsäule. Bild 4 zeigt einen Vertikalschnitt der Säule zu drei verschiedenen Zeitpunkten, beginnend mit der Anfangsbedingung einer homogen durchmischten Suspension. Jede Dichteschicht ist farblich gekennzeichnet. Der Absinkprozess wird durch Massenfluss, bestimmt durch eine Sinkgeschwindigkeit, in eine nächst höher konzentrierte Schicht realisiert, dadurch werden neue Dichteschichten aktiviert.

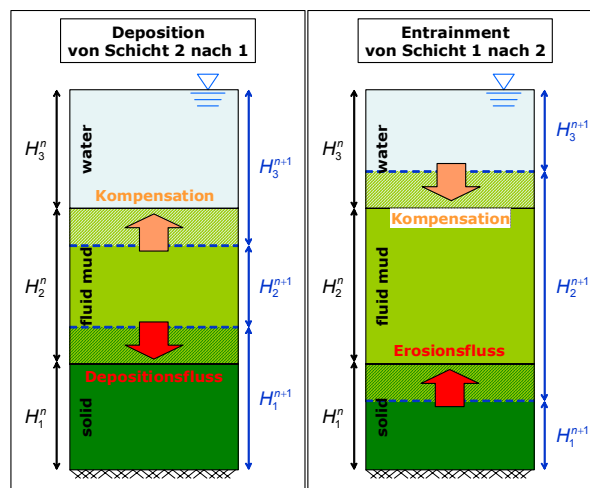


Bild 3: Prinzipskizze zum Massentransport im isopyknischen Modell.

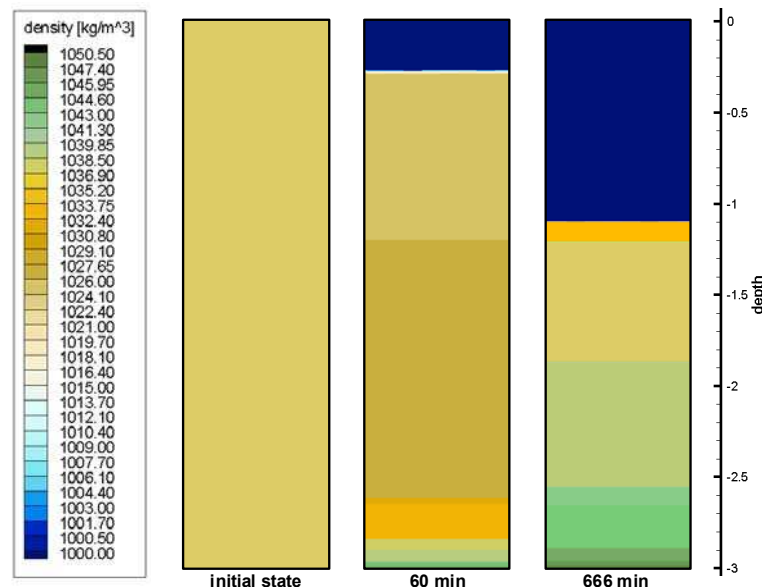


Bild 4: Sedimentation in einer Absetzsäule simuliert durch Massenaustausch zwischen Dichteschichten (links: voll durchmischt, Mitte/rechts: während des Absetzprozesses, Klarwasser-schicht in dunkelblau).

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das Forschungsprojekt hat eine Laufzeit von drei Jahren (Okt. 2007 bis Okt. 2010). Nach der erfolgten Entwicklung eines rheologischen Spannungsansatzes für Flüssigschlick und der Erweiterung des isopyknischen numerischen Modellverfahrens auf Transport und Austauschprozesse von Flüssigschlick folgen jetzt Anwendungen auf schematische und realistische Modellgebiete (z.B. die Ems).

#### 5 Literatur

- [1] Knoch, D.: *Simulation of fluid mud using an isopycnal model – first results*, 5th UnTRIM Workshop, 19.-21. Mai 2008, Trento, Italien, Vortrag.
- [2] Knoch, D.: *MudSim: Simulation of fluid mud using an isopycnal model*. Gesinus-Treffen 2008, BAW Karlsruhe, 05.11.2008, Vortrag.
- [3] Knoch, D., Terheiden, K., Malcherek, A.: *MudSim: Entstehung, Entwicklung und Transport von Flüssigschlick*, 13. KFKI Seminar zur Küstenforschung, 05. November 2008, Bremerhaven, Vortrag. [http://kfk.baw.de/fileadmin/kfki-seminare/2008/02-MudSim\\_Knoch.pdf](http://kfk.baw.de/fileadmin/kfki-seminare/2008/02-MudSim_Knoch.pdf)
- [4] Knoch, D., Malcherek, A.: *A numerical model for the simulation of fluids with different rheological behavior*. 10. International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes (INTERCOH), Brasilien, 2009, special issue of Ocean Dynamics, paper submitted.
- [5] D. Knoch: *A numerical model for simulation of fluids of different rheological behavior*. Gesinus-Treffen 2009, TU Braunschweig, 16./17.07.2009, Vortrag.
- [6] Knoch, D.: *MudSim: A numerical model for simulation of fluids of different rheological behavior*, 6th UnTRIM Workshop, May 11-13, 2009, Trento, Italien, Vortrag.

## **SensorWeb-WSV - Aufbau eines Sensorweb-Rahmenwerks für unterschiedliche Messparameter**

**Netzplan-Nr.:** A39560270001

**Projektleiter:** Dietmar Mothes, DLZ-IT BMVBS, Referat IT-Einsatz im technischen Bereich (IT 2)

**E-Mail:** dietmar.moths@dlz-it-bvbs.bund.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

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

Die realzeitliche Integration von Sensordaten in ein WWW basierendes Sensor-Netzwerk (Sensor Web) ist eines der Hauptforschungsschwerpunkte des Open GIS Consortiums (OGC) im Rahmen der OGC Web Service Programme (OWS). Koordiniert wird die weltweite Entwicklungsarbeit im Bereich Sensor Web über die Sensor Web Enablement (SWE) Working Group. Im Rahmen von OWS-6 wurden neue praktikable und operable Umsetzungen entwickelt. Generell ist davon auszugehen, dass Sensor Web zukünftig der Standard wird, Sensordaten zu erfassen, beschreiben und mit anderen Fach- und Geoinformationen zu vernetzen. Auf dem Technical Meeting des OGC im Dezember 2008 in Valencia wurde zusätzlich eine Hydrology Domain Working Group (Hydrology DWG) gegründet. Das Ziel der DWG ist die Bearbeitung von konzeptionellen, technischen und institutionellen Herausforderungen, die sich aus dem Management und dem Austausch hydrologischer Informationen ergeben. Dabei ist eine Zusammenarbeit mit anderen OGC-Arbeitsgruppen und die Kommunikation mit der hydrologischen Fachgemeinde ein wichtiges Ziel.

Das DLZ-IT BMVBS beteiligt sich über unterschiedliche Kooperationen mit Forschungsträgern aus der Verwaltung (GDI-DE, PortalU und Wupperverband), der Wissenschaft (Friedrich-Schiller Universität Jena und CSIRO in Australien) und der Industrie (disy GmbH, KISTERS AG und 52°N GmbH) im Rahmen des Forschungsprojekts SensorWeb-WSV seit 2007 an den Forschungsarbeiten. Seit der Bearbeitung des Forschungsthemas Sensor Web im Rahmen der SWE Initiative im Jahr 2005 sind grundlegende Konzepte, Standards und Normen entwickelt worden, die es SensorWeb-WSV ermöglichen, ihre sensorbezogenen Daten über Sensor Web einheitlich zu verarbeiten (abrufen, analysieren, alarmieren, steuern und archivieren) und behördenintern (Intranet) sowie weltweit (Internet) zur Verfügung zu stellen. Seit 2009 bringt das DLZ-IT BMVBS sich mit dem Forschungsprojekt SensorWeb-WSV aktiv in die Entwicklungen und Abstimmung der Hydrology DWG ein und erarbeitet SWE Standards und Dienste für den Einsatz in Wirksysteme der WSV.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Sensordaten spielen im Rahmen des Betrieb und der Unterhaltung der Wasserstraßen sowie im Neubau zum Bauwerksmonitoring der Anlagen in der WSV eine äußerst wichtige Rolle. Dabei werden heterogenen Sensorentypen unterschiedlicher Hersteller in unterschiedlichsten Messnetzen eingesetzt. Diese umfassen das nationale Pegelmessnetz der WSV, einzelne WSA-Grundwassermessnetze und kleinere Messnetze einzelner Anlagen wie Schleusen und Wehren zur Bauwerksüberwachung. Das FuE-Vorhaben 'Aufbau eines Sensor Web-Rahmenwerks für unterschiedliche Messparameter (SensorWeb-WSV)' nutzt die Standards der OGC aus dem Geo- und Sensorbereich und wird bis zum Jahr 2010 die Grundlagen für eine standardisierte Beschreibung der Sensoren, Messstellen, Messnetze, Geobezügen, ihrer Kommunikationsverbindungen und ihren Schnittstellen entwickeln. Die Sensor Web Dienste bilden dabei den zentralen Baustein um das Management von Geo- und Sensordaten nachhaltig und wirtschaftlich für die WSV zu entwickeln, zu implementieren und dauerhaft zu betreiben.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Seit Beginn des Projektes im Jahr 2007 haben sich die Untersuchungsziele von kleinen prototypischen Anwendungen (wie die SensorWeb Lösung für die Schleuse Sülfeld, siehe Forschungsbericht 2008) zur Beteiligung an der internationalen Standardisierungsdiskussion im Rahmen der Hydrology DWG verschoben. Zwar werden weiterhin, die ursprünglich definierten Forschungsziele, wie:

- die Analyse von Sensor Web Spezifikationen und Diensten sowie Machbarkeitsanalysen für unterschiedliche Messnetze und Sensortypen (siehe Pegel, Grundwasser und Bauwerksmonitoring),
- die Integration von Rechteverwaltung und Authentifizierung sowie die technische Bewertung des SOA-Ansatzes in der derzeitigen Client-Architektur und,
- die Ableitung von Standards zur Beschaffung von Sensoren (Kriterienkatalog zur Sensorauswahl bei spezifischen Fragestellungen, Aufstellung Sensor Dictionary nach SensorML)

untersucht, doch geschieht dies nun unter dem Fokus der Entwicklung einer einheitlichen internationalen Sensordatenlösung.

## 2 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen des Forschungsprojektes werden Spezifikationen und Standards der SWE hinsichtlich der obigen Untersuchungsziele getestet und bewertet. Die Untersuchungsmethoden verwenden die Instrumente der Analyse und Bewertung. Sie dienen zum KnowHow Aufbau und zur kompetenten Beteiligung an der internationalen Standardisierungsdiskussion.

## 3 Ergebnisse

Die Forschungsergebnisse im Jahr 2009 wurden maßgeblich durch die internationale Weiterentwicklung der SWE Standards beeinflusst. Es zeigte sich deutlich, dass die in den Vorjahren 2007 und 2008 erzielten Ergebnisse von SensorWeb-WSV wichtig waren um sich an der internationalen Weiterentwicklung von SWE zu beteiligen. So konzentrierten sich die Forschungsarbeiten im Jahr 2009 einerseits auf die Beurteilung der SWE Dienste in Bezug auf Performance und ihre Umsetzung in Wirksystemen. Andererseits wurde SensorWeb-WSV ein wichtiges Projekt in der Entwicklung eines gemeinsamen internationalen Standards zur Beschreibung hydrologischer Daten und beteiligt sich durch die Zusammenführung von SensorWeb-WSV und XHydro in der DWG Hydrology an der Weiterentwicklung von WaterML2.0.

### Performance und Umsetzbarkeit:

Die durchgeführte SWE-Machbarkeitsstudie für die Schleuse Sülfeld im Jahr 2008 zeigte, dass über Sensor Web für bereits bestehende Anwendungen effiziente Lösungen zum Umbau in eine Service orientierte Architektur geschaffen werden können, die eine Einbindung in überregionale und internationale Dateninfrastrukturen erlauben. Diese Erkenntnis war äußerst wichtig um SWE Standards und Dienste als zukünftige Alternative zu proprietären Systemen in der Sensordatenerfassung und –übertragung zu entwickeln. Dies verdeutlichte auch die Entwicklung des PEGELONLINE-SOS (PO-SOS), der die von PEGELONLINE bereitgestellte SOAP/WSDL Webserviceschnittstelle nutzt um die Mess- und Metadaten über einen OGC – konformen SOS bereitzustellen.

Beide Pilotprojekte zeigten auch die Probleme auf, die eine direkte Nutzung in Wirksystemen der WSV noch schwierig gestalten. Diese sind vor allem in der nicht ausreichenden Performance der Dienste und Klienten zu sehen. Ein weiteres Problem besteht darin, dass W3C-Webservices grundsätzlich die Verwendung von SOAP vorschreiben, während dies bei den OGC-Webservices nur optional möglich ist. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse konnten im Jahr 2009 folgende Aussagen zur Performance (Generalisierung oder Begrenzung von Zeitreihen) erarbeitet werden:

- Momentan ist die Generalisierung (siehe SWE System Sülfeld sowie im PO-SOS) auf der Seite des Dienstes (SOS) umgesetzt. Im SOS Klient (Zeitreihenviewer) ist bisher keine Generalisierungsfunktion implementiert. Aufgefallen ist, dass sich die Generalisierungsfunktion im SOS bei unterschiedlichen Zeitreihen (Unterschiede im Sensortyp oder der zeitlichen Auflösung) sehr schwierig konfigurieren lässt, da die Konfiguration für den gesamten Dienst und nicht je Zeitreihe festgelegt ist. Eine Lösung würde eine Generalisierungsfunktion losgekoppelt vom SOS Dienst darstellen, die vom Nutzer konfigurierbar ist. Dies ist durch die Erweiterung der GetObservation Operation um einen Parameter zur Generalisierung (z.B. einfachster Fall: Generalisierung=[Aktiv|Inaktiv]) möglich. Dann hätte ein Nutzer, der z.B. die kompletten Rohdaten benötigt die Möglichkeit alle Daten abzurufen und jemand der nur Visualisieren möchte (SWE SOS Client) könnte nur die generalisierten Daten abrufen.

- Die Begrenzung der Ergebnismenge auf eine einstellbare Zahl von Beobachtungen kombiniert mit der Möglichkeit einen Offset anzugeben, ist ein weiterer Lösungsansatz. Dadurch ist die Implementierung von Klienten möglich, die durch die Ergebnismenge blättern können. Der verwendete SOS 1.0 sieht bisher keinen Parameter im GetObservation-Request vor, der eine Umsetzung dieses Szenarios ermöglicht.
- Die beschriebenen möglichen Lösungsansätze werden derzeit durch weitere Performancemessungen ausgewertet. Seit Ende 2009 werden mit dem Forschungspartner 52° Grad North Umsetzungen dazu erarbeitet.

Arbeiten innerhalb der Hydrology DWG zur Entwicklung von WaterML2.0:

Durch die Koordinierung einer einheitlichen internationalen Entwicklung eines hydrologischen Zeitreihenmodells, was mit der Gründung der Hydrology DWG entstanden ist, sind im Jahr 2009 die Ergebnisse von SensorWeb-WSV und XHydro aufeinander abgestimmt worden. Erstes Ergebnis dieser Zusammenführung von Forschungsergebnissen (SensorWeb-WSV) und Projektergebnissen (XHydro) ist die Festlegung eines einheitlichen Inhaltsmodel (Ergebnisse aus XHydro) unter der Nutzung von SWE Standards (Ergebnisse aus SensorWeb-WSV). Hieraus entstand das interne technische Dokument der WSV „Pegeldatenübertragung der WSV - Technische Festlegung“, das für das Pegelmessnetz der WSV die technischen Vorgaben unter der Berücksichtigung von O&M, SensorML, XHydro und SOS definiert (siehe Bild 1). Dies wäre ohne die Generierung von KnowHow im Rahmen von SensorWeb-WSV nicht möglich gewesen.

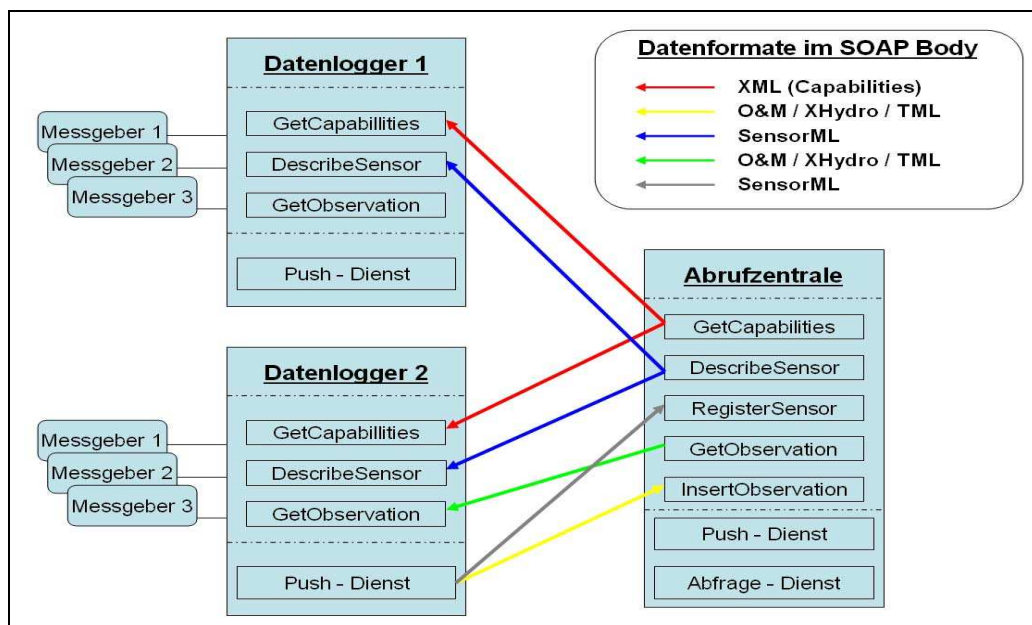
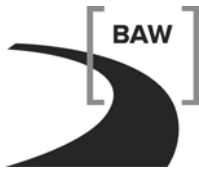


Bild 1: Zukünftige Pegeldatenübertragung in der WSV vom Datenlogger zur Abrufzentrale

Diese Arbeiten fließen weiter in die Entwicklung des hydrologischen Zeitreihenstandards WaterML2.0 ein. Bei WaterML2.0 handelt es sich, anders als der Name vermuten lässt, nicht um eine evolutionäre Weiterentwicklung auf der Basis von WaterML 1.1. Stattdessen verbirgt sich dahinter eine vollständige Neuentwicklung als Grundlage für ein hydrologisches Zeitreihenmodell des OGC.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das zukünftige Arbeitsprogramm orientiert sich an den noch offenen Forschungsfragen des Untersuchungsziels. Dabei ist die Beteiligung an den Arbeiten der Hydrology DWG das Hauptziel geworden. In 2010 beteiligt sich das Forschungsprojekt mit mehreren Forschungspartnern an dem „Surface Water Interoperability Experiment“ der OGC um die Entwicklung von WaterML2.0 praktisch zu begleiten. Das Forschungsvorhaben ist derzeit bis Ende 2011 geplant. Eine Weiterführung oder die Konzep-



tion eines darauffbauenden Forschungsvorhabens könnte sich aus den Ergebnissen der OGC im Bereich Sensor Web ergeben und wird vom DLZ-IT beobachtet.

## **5 Literatur**

- [1] Klipp R., Mothes M. und Michl C. (2009): SensorWeb-WSV - OGC-Konformer Zugriff auf hydrologische Messwerte der Bundeswasserstraßen, In: Tagungsband FOSSGIS 2009, S. 79 bis 84.
- [2] Michl C., Klipp R. und Mothes M. (2009): Hydrological Sensor Networks in Germany - Introducing SensorWeb-WSV, In: Proceedings 18th World IMACS/MODSIM Congress.

## **Setzungen von Sanden bei Schwingungsanregung**

**Netzplan-Nr.:** A39560610016

**Projektleiter:** Dr.-Ing. U. Zerrenthin, Abteilung Geotechnik, Referat Baugrunddynamik (BD)

**E-Mail:** uwe.zerrenthin@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

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

Messungen der BAW an Bauten und auf Erdbauwerken bei Rammarbeiten zeigen, dass bereits bei relativ geringen Erschütterungsgrößen mit Partikelbeschleunigungen an der Bodenoberfläche  $a < 0,5$  g Setzungen im Dezimeter-Bereich in sandigen Böden auftreten können. Neben vertikalen Setzungen durch Bodenverdichtung wurden bei Vibrationsrammungen in standsicheren Dämmen im luftseitigen Dammbereich auch relativ große Dammverformungen in Richtung der Falllinie, z. T. bis zum Abreißen und Gleiten von Teilbereichen, beobachtet.

Die Umlagerungsvorgänge des Bodens bei dynamischer Beanspruchung sind außerordentlich komplex und vielschichtig und die Zahl der relevanten Einflussparameter ist groß. In der Literatur existiert eine Vielzahl von Untersuchungen zu Einzelproblemen, insbesondere zum Verhalten von Bauwerken unter dem Einfluss von Erdbeben. Die Erfahrungen aus Messungen der BAW auf Baustellen der WSV zeigen, dass die Erfahrungen aus dem „Erdbebenwesen“ auf Baumaßnahmen nicht übertragbar sind. Lösungen für ausreichend genaue Prognosen von Bauwerkssetzungen und/oder Veränderungen der Standsicherheit von Bauten bei erschütterungsintensiven Baumaßnahmen liegen in der zugänglichen Literatur bisher nicht vor.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Schadensfälle im Umfeld von Rammarbeiten, wie sie trotz Einhaltung zulässiger Schwingungshaltswerte der DIN 4150-3 für Bauwerke immer wieder beobachtet werden, machen bei der Planung erschütterungsrelevanter Bauverfahren eine Abschätzung und Eingrenzung des potenziellen Gefahrenbereiches zwingend notwendig. Der Anteil der Vibriertechnik hat in den letzten Jahren erheblich zugenommen. Die hochfrequenten Schwingungen moderner Hochfrequenzvibratoren werden von Gebäuden nur noch in geringem Maße übernommen und sind weniger spürbar. Dadurch kann die Gefahr von Bauwerksschäden durch Setzungen stark unterschätzt werden. Besondere Sicherheitsrelevanz hat dieses Problem bei Rammarbeiten im Nahbereich von Bauwerksgründungen, Kanalseitendämmen und Zugankern. In den Normen liegen hinsichtlich der Umlagerungsvorgänge im Baugrund keine Anhaltswerte für zulässige Erschütterungen vor.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel dieser Untersuchungen ist eine experimentell gesicherte Eingrenzung des Gefährdungsbereiches von Erschütterungsquellen aus Bauverfahren durch eine größenordnungsmäßig richtige Abschätzung der zu erwartenden Verschiebungen von Gründungskörpern und Erdbauwerken bei indirekter Schwingungsanregung über den Baugrund.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Zur Bestimmung der maßgebenden Parameter für die relative Volumenänderung von Sanden bei Wechsellasten wurden im Frequenzbereich  $0,2 \text{ Hz} \leq f \leq 150 \text{ Hz}$  zyklische und dynamische Elementversuche in Odometer- und Triaxialzellen durchgeführt. Mit Hilfe von Modellversuchen (Modellrammbär - Modellbohle - Halbraum ohne Auflast) wurden Erschütterungen im Boden bei Schlag- und Vibrationsrammung im Zusammenhang mit der Eigensetzung des Bodens experimentell untersucht. Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera konnten die Partikelbewegungen im Bereich der Spitze einer Modellbohle bei stoßartiger und stationärer Schwingungsanregung dargestellt werden. Im Rahmen der gutachterlichen Betreuung von Baumaßnahmen der WSV erfolgten zahlreiche Messungen von Erschütterungen und Setzungen mit dem Ziel, Baugrundverschiebungen u. a. mit mess- und prognostizierbaren Erschütterungsdaten zu korrelieren. Parallel zu den experimentellen Untersuchungen hat



die TU Berlin, Institut für Grundbau und Bodenmechanik im Auftrag der BAW den Einfluss der Schwingungsanregung durch Baumaßnahmen auf die Standsicherheit von Wasserstraßenseitendämmen mit Hilfe numerischer Verfahren untersucht.

Für Parameterstudien hinsichtlich des Einflusses von Bodenschwingungen auf das Tragverhalten von Zugankern wurde ein als Elementversuch konzipierter Versuchsstand aufgebaut (siehe Bild 1). Das Zugelement besteht aus Quadratrohr 20 mm x 20 mm x 150 mm (Stahl). Der eingebaute trockene Sand hat einen Ungleichförmigkeitsgrad von  $U = 2$  und eine Dichte von  $\rho \approx 1880 \text{ kg/m}^3$ . Die dynamische Belastung erfolgt mit Hilfe eines Schwingtisches mit Frequenzen im Bereich  $f = 20 \dots 200 \text{ Hz}$  durch Trägheitskräfte des unter statischer Zuglast stehenden Zugelementes. Die zeitlich hoch aufgelöste Messung der Schwinggeschwindigkeit an der Bohle und am Zugelement erlaubt durch Integration bzw. Differentiation auch den relativen Schwingweg und die relative Schwingbeschleunigung zwischen Behälter und Zugelement zu bestimmen. Die relative Ankerbewegung wird zusätzlich mit einem induktiven Wegaufnehmer gemessen. Eine statische oder zyklische Belastung mit sehr niedrigen Frequenzen kann mit Hilfe von Gewichten und/oder eines Wassertanks über ein Stahlseil und zwei Umlenkrollen aufgebracht werden. Untersucht wurde der Einfluss der statischen Zuglast, der Oberfläche des Ankers, der Einbindetiefe des Ankers, der Frequenz der Wechselbelastung ( $f = 0,1 \dots 200 \text{ Hz}$ ), der Amplitude der Wechselbelastung (Schwingweg, Schwinggeschwindigkeit, Schwingbeschleunigung) und der Zahl der Lastwechsel auf das Trag- und Kriechverhalten.

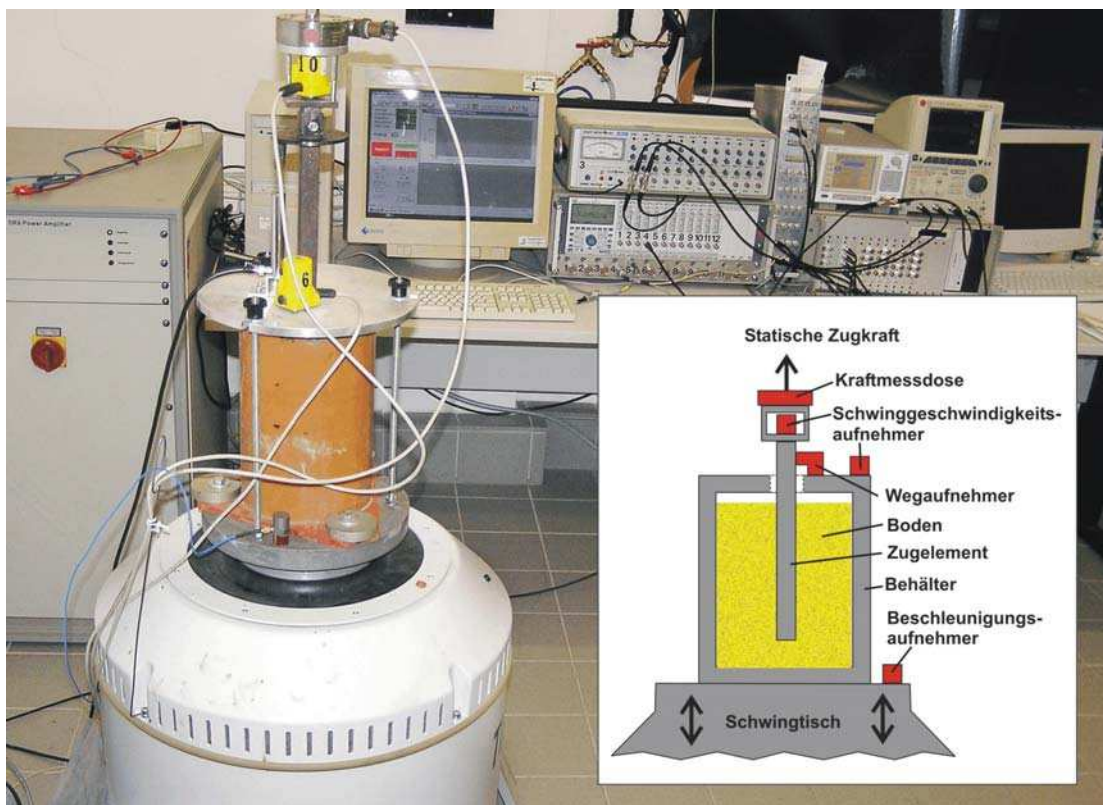


Bild 1: Versuchsstand zur Untersuchung des Einflusses von Schwingungen auf das Tragverhalten eines Zugelementes

### 3 Ergebnisse

Die Parameterstudien mit Hilfe der Ödometer- und Triaxialversuche zeigten, dass die Volumenänderung von Sanden maßgeblich von den Größen Lagerungsdichte, Ungleichförmigkeitsgrad, Wechselspannungsverhältnis und Zahl der Lastwechsel abhängt. Die Frequenz und die zeitliche Form der Axialspannungsänderung (Dauer- oder stoßartige Laständerung) haben dagegen nur einen vernach-

lässigbaren Einfluss auf das Volumenänderungsverhalten [1]. Nachberechnungen von Setzungen dynamisch beanspruchter Böden bei Rammarbeiten auf der Grundlage von Ergebnissen aus Elementversuchen waren nicht zufrieden stellend möglich.

Ein sehr wichtiges Ergebnis der Modell- und Feldversuche in Hinblick auf eine Bestimmung von Sicherheitsabständen zu Rammungen ist der Nachweis, dass auch bei sehr geringer Lagerungsdichte des Bodens unterhalb einer bestimmten Erschütterungsamplitude keine messbaren Setzungen, auch bei sehr langer Einwirkungsdauer, auftreten. Ein wesentliches Ergebnis der Felduntersuchungen ist die Proportionalität der Setzung des Baugrundes mit der auf der Bodenoberfläche messbaren Schwingungseinwirkung, in der die Schwinggeschwindigkeit der Bodenoberfläche und die Zahl der Lastwechsel eingehen. Auf der Grundlage von Schwingungs- und Setzungsmessungen an Erdbauwerken bei 10 Bauvorhaben der WSV wurde ein empirisches Modell zur Prognose der Setzungen von locker bis mitteldicht gelagerten Sanden bei Vibrationsrammung von Spundwandelementen entwickelt. Dieses Modell wurde dann für die Prognose der Setzung von Flachgründungen im Nahbereich von Vibrationsrammungen erweitert. Maßgebende Eingangsgrößen sind die Schlagzahl der schweren Rammsonde, die Vertikalspannungsverteilung im Boden und die Schwingungseinwirkung. Mit dem im Rahmen dieser Forschung entwickelten empirischen Prognosemodell konnten die Setzungen eines Tunnelbauwerkes der Deutschen Bahn im Rahmen der Betreuung des Neubaus einer Kanalüberführung der HOW quantitativ abgeschätzt und nach der Bauausführung durch Messungen bestätigt werden [2].

Die durchgeführten Elementversuche zum Verhalten von Zugankern unter Schwingungsbelastung konnten bisher noch nicht vollständig ausgewertet werden. Das Tragverhalten des Ankeres unter Schwingungsbelastung wird vor allem vom relativen Schwingweg zwischen Anker und Boden und dem Verhältnis aus statischer Zuglast zur Bruchlast bestimmt. Bei konstantem Schwingweg hat die Schwingungsfrequenz bei dynamischer Anregung einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Bewegung des Ankeres. Bei zyklischer Belastung nimmt mit abnehmender Frequenz auf Grund von Kriechprozessen der Einfluss der Frequenz auf die Bewegung des Ankers zu. Es zeigte sich auch, dass unterhalb eines bestimmten Schwingweges keine bleibende Verschiebung des Ankers erfolgt.

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

2010: Auswertung bereits durchgeführter Versuche und weitere Parameterstudien zum Tragverhalten von Zugankern unter zyklischer und dynamischer Schwingungsbelastung mit Hilfe von Elementversuchen

2011: Abschlussbericht

#### **5 Literatur**

- [1] Zerrenthin, U., Jung, D. (2000): Zum Problem der Setzung wechselbelasteter nichtbindiger Böden. In: Beiträge zum Workshop : Boden unter fast zyklischer Belastung. Schriftenreihe des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, Heft 32, S. 183-200
- [2] Zierach, R., Zerrenthin, U. (2009): Methoden der Baugrunderdynamik im Wasserbau. In: BAW-Kolloquium: Aktueller Stand und Herausforderungen der Geotechnik im Wasserbau am 24. September 2009 in Karlsruhe, S. 61-69

## **Statistische Auswertung von Erschütterungsemissionen**

**Netzplan-Nr.:** A39560610020

**Projektleiter:** Dipl.-Phys. R. Zierach, Abteilung Geotechnik, Referat Baugruddynamik (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 Angaben mit reduziertem Streubereich erhalten werden. Beide Fälle sind für die praktische Arbeit sinnvoll und notwendig.

### 3 Ergebnisse

Teilergebnisse für die 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. In Bild 1 ist beispielhaft die auf die wirksame Größe der Rammenergie  $E$  bezogene Erschütterungsgröße  $v$  für Schlagrammungen unabhängig von der Baugrundart in Abhängigkeit von dem Abstand  $R$  dargestellt. Jeder Messpunkt stellt den auf die wirksame Schlagenergie  $E^{0,5}$  bezogenen Maximalwert der Bodenerschütterung  $v$  einer Pfahlrammung in dem entsprechenden Abstand  $R$  dar.

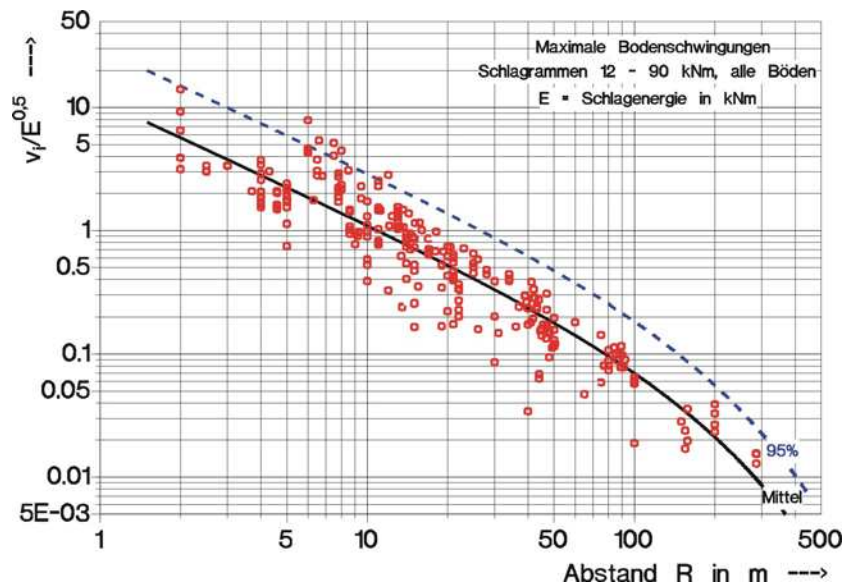


Bild 1: Bodenerschütterungen  $v$ , bezogen auf die wirksame Schlagenergie  $E^{0,5}$  in Abhängigkeit vom Abstand  $R$  für alle Böden bei Schlagrammungen mit Schlagenergien  $E$  von 12 bis 90 kNm

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. In diesem Programm sind Module für Schlagrammungen, Vibrationsrammungen, hydraulische Pressen, Meißelarbeiten, Verdichtungsarbeiten, Sprengungen sowie Erschütterungen aus Schiffsverkehr und durch herab fallende 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. Zur Vorbereitung von Planfeststellungsverfahren können damit Erschütterungsprognosen wesentlich schneller und zuverlässiger getätigt werden. Auf

Anfragen von Ämtern zu Erschütterungsproblemen bei der Durchführung von Baumaßnahmen kann inzwischen wesentlich kurzfristiger reagiert werden.

Im Zuge einer Vergabe wurde auch eine große Datenmenge aus früheren Messungen für die Aufnahme in die neue Software vorbereitet. Hieraus ergibt sich für die Weiterentwicklung der Prognoseverfahren die Möglichkeit, weitere Parameterstudien und Korrelationen auf einer noch breiteren Datenbasis durchzuführen. Die Überführung dieser Daten konnte noch nicht abgeschlossen werden.

Im Zusammenhang mit einer Ausbaumaßnahme am Neckar konnten die dort angefallenen Messergebnisse von Dritten in die Untersuchungen mit einbezogen werden. Bei den durchgeführten Messungen sind in einem sehr großen Umfang Daten über die Schwingungsgrößen am Fundament, dem Obergeschoß und den Decken von Wohngebäuden angefallen, so dass sich hieraus statistische Aussagen über die Größe der Fundamentalschwingungen und die Übertragungsfunktionen für die Deckenschwingungen und die Schwingungen im Obergeschoß ableiten lassen (z.B. siehe Bild 2).

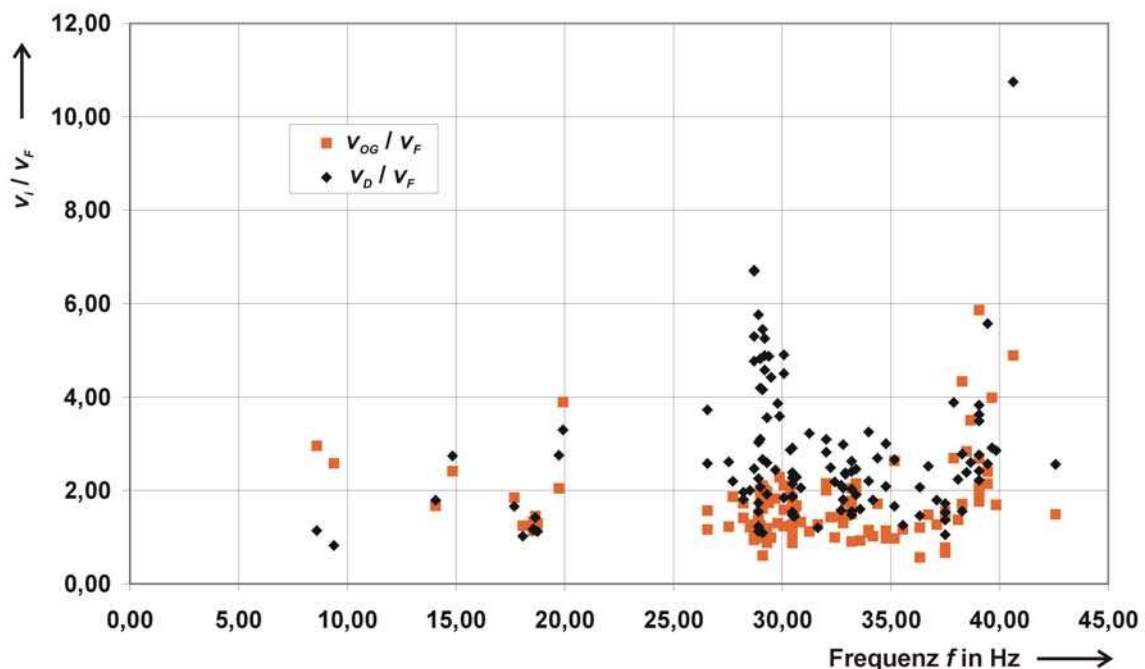
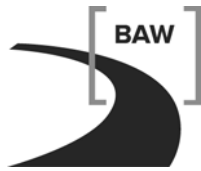


Bild 2: Frequenzabhängigkeit der Übertragungsfaktoren der Schwinggeschwindigkeit einer Gebäudedecke  $v_D / v_F$  bzw. der horizontalen Gebäudeschwingungen  $v_{OG} / v_F$  bezogen auf die Fundamentalschwingungen eines Gebäudes beim Einbringen von Strahlspundbohlen mit Hilfe einer Vibrationsramme (Messung am Seitenkanal Ladenburg, 2008)

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

In den zukünftigen Arbeitsschritten sind weitere Verbesserungen und Anpassungen des vorliegenden Prognoseprogramms geplant. Ältere vorhandene und neu gewonnene Daten müssen weiterhin bearbeitet und ausgewertet werden. Für einige Bauverfahren liegen noch nicht für alle Emissions- und Immissionsbedingungen ausreichend statistisch abgesicherte Daten aus Untersuchungen vor. Da aus Kostengründen keine Versuche ohne Bezug zu konkreten Baumaßnahmen durchgeführt werden, ist die Einbeziehung neuer Daten nur in Abhängigkeit von entsprechenden zukünftigen Baumaßnahmen in der WSV möglich. Das Forschungsvorhaben soll bis 2014/15 unter Einbeziehung der bis dahin noch anfallenden Messergebnisse zum Abschluss gebracht werden.



## **III Neue FuE-Vorhaben in 2009**

## **Mauerwerk im konstruktiven Wasserbau**

**Netzplan-Nr.:** A39510370007

**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**

Im Rahmen des FuE-Vorhabens soll der Frage nachgegangen werden, welche Anforderungen in baustofflicher und ausführungstechnischer Hinsicht bei der Instandsetzung von Mauerwerk im konstruktiven Wasserbau zu berücksichtigen sind. Für den Wasserbau sind derzeit keine eigenen Regelungen bekannt.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Im Bereich der WSV finden sich oft ältere Bauwerke, die in Teilen oder sogar komplett aus Mauerwerk erstellt worden sind. Bedingt durch das hohe Alter dieser Anlagen stehen in Zukunft vermehrt Grundinstandsetzungen an. Hierfür sollen der WSV geeignete Hilfsmittel und Regularien zur Verfügung gestellt werden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Für die Instandsetzung von Mauerwerk im Verkehrswasserbau sollen unter baustoffstofflichen und ausführungstechnischen Aspekten Anforderungen für eine dauerhafte und zielgerichtete Instandsetzung festgelegt werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

#### **1. Untersuchungsschritt:**

Durch ein Ingenieurbüro wird ein Sachstandsbericht zum aktuellen technischen Stand erarbeitet. Darin wird untersucht und zusammengestellt, was derzeit für die Instandsetzung von Mauerwerk an Regelwerk vorhanden ist und wie es angewendet wird (national und europäisch). Weiter werden Bauwerke in Deutschland mit verschiedenen Konstruktionsprinzipien und Materialien betrachtet und die Erfahrung der Verantwortlichen vor Ort mit erfolgten Instandsetzungen abgefragt. Vorhandene Literatur und Forschungsvorhaben werden auf ihre Übertragbarkeit auf den Wasserbau hin überprüft. Ziel ist es, den aktuellen Stand darzustellen, offene Fragen aufzuzeigen und Schnittstellen zu Forschungsvorhaben Dritter darstellen.

#### **2. Untersuchungsschritt:**

Auf der Grundlage des Sachstandsberichtes soll ein Papier für die WSV mit konkreten Anforderungen für die Instandsetzung von Mauerwerk durch ein Fachgremium der BAW erarbeitet werden. Für offene Fragen, die im Sachstandsbericht aufgezeigt wurden, soll mit potentiellen Forschungspartnern an Lösungen gearbeitet werden. Die weiteren Untersuchungsmethoden ergeben sich in Abhängigkeit von den Ergebnissen des 1. Untersuchungsschrittes.

### **3 Ergebnisse**

Die Sachstandsstudie befindet sich in der Bearbeitung. Durch die vorhandenen Normen werden die Belange des Wasserbaus nicht ausreichend abgedeckt, so dass hier ein Regelungsbedarf für die WSV besteht. Dabei ist auch die Umstellung auf europäische Normen zu beachten.

Das Mauerwerk ist hinsichtlich der Beurteilung und Instandsetzung zu unterteilen, einmal in die Gruppen Naturstein- und Ziegelmauerwerk, zum anderen in die Gruppen Vollmauerwerk und Vorsatzschale. Weiter hat sich anhand aktueller Wartungsdefizite gezeigt, dass Bauwerke aus Mauerwerk einer regelmäßigen Wartung durch geschulte Facharbeiter bedürfen. Dieser Punkt wurde in den Sachstandsbericht als neuer Punkt hinzugenommen.



#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Sachstandsstudie ist derzeit in Bearbeitung. Der Auftrag ist um den Punkt Unterhaltung, Wartung erweitert worden. Die Fertigstellung ist für Mitte 2010 geplant. Das weitere Vorgehen richtet sich nach dem Ergebnis der Sachstandsstudie.



*Bild 1: Oberhaupt-Notverschlussnische mit gerissenem Mauerwerk*



*Bild 2: Unterhaupt mit wasserdurchlässigen Fugen, Materialverlust durch Abwitterung und schadhafte Kantensteinenkonstruktion*



## **Hydraulischer Grundbruch bei 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 bei den üblichen Berechnungsansätzen nicht berücksichtigt werden.

Aufgrund aktueller Baumaßnahmen wurden von der Bundesanstalt für Wasserbau numerische, geohydraulische Berechnungen durchgeführt, wobei sich prinzipielle Fragen zum Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch bei geringer Einbindung von unterströmten Wänden in den Baugrund und baugrubenseitiger Sicherung mittels Auflastfilter ergaben. Zur sicheren Dimensionierung des Auflastfilters wurde ein auf der numerischen Strömungsberechnung basierendes Verfahren vorgestellt, das auch die Berücksichtigung von Sicherheiten nach DIN 1054 ermöglicht [Odenwald & Herten, Hydraulischer Grundbruch: neue Erkenntnisse, Bautechnik 85/9, S. 585 – 595, 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. Bei dem von der BAW entwickelten, auf numerischen Strömungsberechnungen basierenden Nachweisverfahren erfolgt der Nachweis gegen Hydraulischen Grundbruch auf der Grundlage eines Kräftegleichgewichtes an einem Ersatzkörper, wobei Reibungskräfte auf der sicheren Seite liegend nicht berücksichtigt werden.

Der Versagensmechanismus soll zunächst durch Modellversuche, basierend auf den bisherigen theoretischen Untersuchungen, eruiert werden. Vorgesehen sind sowohl Zylinderdurchströmungsversuche als auch Versuche in einem Modellversuchskasten zur maßstäblichen Abbildung einer Wandumströmung. Mittels numerischer Spannung-Verformungsberechnungen (FE-Programm Plaxis) sollen in einem zweiten Schritt die Ergebnisse der Modellversuche nachvollzogen werden. Auf Grundlage der numerischen Berechnungen und der Modelluntersuchungen soll der entwickelte, vereinfachte analytische Berechnungsansatz validiert und ggf. weiterentwickelt werden.

## 2 Untersuchungsmethoden

Für die Bearbeitung der oben genannten Fragestellung sind sowohl theoretische Betrachtungen im Sinne numerischer Analysen von Spannungs- und Verformungszuständen als auch die Durchführung von Versuchen zur Visualisierung des Bruchvorganges und zur Validierung der theoretischen Ansätze geplant.

## 3 Ergebnisse

In einem ersten Schritt wurde die Universität der Bundeswehr München (Prof. Boley) mit der Konzeption eines Versuchsstandes zur Visualisierung des Bruchvorganges des hydraulischen Grundbruchs bei Baugruben mit unterströmten, relativ gering in den Untergrund einbindenden Wänden und baugrubenseitigem Auflastfilter beauftragt. Dieser Versuchsstand besteht aus einem Modellversuchskasten zur maßstäblichen Abbildung einer Wandumströmung.

Um die Einflüsse der Randbedingungen durch die begrenzten Abmessungen des Modellversuchskastens so gering wie möglich zu halten, wurden zur Ermittlung der erforderlichen Abmessungen numerischen Berechnungen durchgeführt. Mittels Vorversuchen wurden verschiedene Einbaumethoden des Bodens hinsichtlich eines homogenen und reproduzierbaren Aufbaus des Versuchsbodens mit einer vorbestimmten Lagerungsdichte und einem gleichmäßigen Sättigungsgrad untersucht. Im Rahmen der Konzeption des Versuchsstandes wurde außerdem die erforderliche Messtechnik (z.B. zum Messen von Hebungen, Durchflüssen, ggf. Porenwasserdrücken), sowie das Messprogramm und Datenerfassung ausgearbeitet.

## 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2010 werden von Universität der Bundeswehr München (Prof. Boley) folgende Arbeitsinhalte erbracht:

- Bau eines Modellversuchskastens
- Einrichten der Messtechnik, der Datenerfassung und der visuellen Dokumentation
- Erstellen des Auswerteprogramms einschließlich Auswertedateien
- Versuchsdurchführung von insgesamt 20 Einzelversuchen

Durch die Versuche sollen folgende Fragen geklärt werden:

- Bei welchem hydraulischen Gefälle in Abhängigkeit von den geometrischen Einflussgrößen (z.B. Wandhöhe, Einbindetiefe, Dicke Auflastfilter) findet ein Versagen statt?
- Wie ist die Erscheinungsform des Versagens (z.B. Bildung eines Erosionskanals, Aufschwimmen eines Bodenkörpers, „sand boiling“)?
- Findet vor dem Bruch eine Volumenvergrößerung (Auflockerung) statt?
- Können die Bereiche, in denen die Auflockerung initial stattfindet, lokalisiert werden.
- Erfolgt die Auflockerung gleichzeitig oder pflanzt sie sich von oben nach unten, von unten nach oben oder seitwärts fort?
- Erfolgt der Bruch plötzlich oder erstreckt sich das Versagen über einen längeren Zeitabschnitt?

Für 2011 ist die Durchführung von Zylinderdurchströmungsversuchen vorgesehen. Ebenfalls in 2011 soll mit den numerischen Spannung-Verformungsberechnungen (FE-Programm Plaxis) begonnen werden, mit denen die Ergebnisse der Modellversuche nachvollzogen werden sollen. Der Abschluss des Vorhabens ist für Ende 2012 mit der Entwicklung eines verbesserten analytischen Berechnungsansatzes geplant.

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

**Netzplan-Nr.:** A39550270116

**Projektleiter:** Dr.-Ing. H. Heyer, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich (K0)

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

### **1 Problemstellung und Ziel**

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

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) bestimmt. Da die Wechselwirkungen zwischen der Dynamik des Wasserkörpers und den vielfältigen Formen und Eigenschaften der Sedimente sehr komplex sind, unterliegt die Simulation der Morphodynamik gewissen Unsicherheiten. Aus diesem Grunde ist es bis heute nicht gelungen, ein skalenübergreifendes Simulationsmodell für die jeweils ortsspezifische Morphodynamik eines größeren Gewässersystems umfassend zu validieren.

Zielsetzung dieses Projektes ist die Definition und Analyse von Sedimenttransportwegen und Sedimenttransportrichtungen, transportierten Mengen und Sedimentbilanzen zum Verständnis der langfristigen und großräumigen Sedimentdynamik im deutschen Küstensaum. Die Kenntnisse über die Bodenbeschaffenheit bezüglich Sedimentbelegung / Wassertiefen (-änderung) / Bodenformen sollen konsistent in einem Bodenmodell zusammengefasst und zur Kalibrierung der morphodynamischen Modellierung herangezogen werden. Weitergehend soll die Prognose großräumiger Transport- und Formänderungsprozesse erfolgen.

Die Entwicklung der Bodenformen der Küstengewässer kann verschiedenen Raum- und Zeitskalen zugeordnet werden. Das Verhalten oder die Eigenschaften einzelner Sedimentkörner oder Sedimentzusammensetzungen, die Dynamik von Transportkörpern (wie z. B. Unterwasserdünen) oder die Kolkentwicklung an Bauwerken können den kleinen Skalen zugeordnet werden. Auf der räumlich mittleren- bis großen Skala geht es um die Veränderungen und Verlagerungen von Sedimenten im Bereich ausgewählter Küstenabschnitte mit dem Küstenvorfeld, Ebbdeltas und Wattenzugsgebieten oder in Ästuaren mit ihren weit in die Deutsche Bucht reichenden Mündungsbereichen. Im Verbundprojekt wird eine Betrachtungsweise in noch größeren Skalen angestrebt, indem auch der Zusammenhang zwischen der Nordsee und der Deutschen Bucht mit ihrer amphibischen Küstenzone und den Tideästuaren berücksichtigt wird. Die für den Einsatz im Verbundprojekt vorgesehenen Simulationsmodelle müssen somit in der Lage sein, das Spektrum der kleinen, mittleren und großen Raumskalen zu berücksichtigen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

In der WSV werden im Rahmen der Unterhaltung und des Neubaus Grundlagen über die im Küstenvorfeld transportierten Sedimentmengen sowie der Morphodynamik als Eingangsgrößen für die lokalen Untersuchungen / Prognosen benötigt.

Die Modellsysteme sollen für heutige Bedingungen, sowie für ausgewählte Szenarien (erwartete Klimaänderungen, Anstieg des Meeresspiegels und Änderung des Seegangsklimas) verwendet werden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Forschungsziel des Verbundprojektes ist die Vertiefung der Kenntnisse über die großräumige und langfristige Morphodynamik in der Deutschen Bucht. 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 sollen insbesondere Computermodelle berücksichtigt werden.

Der Anforderungskatalog ist sehr umfangreich und kann deshalb nur im Rahmen eines multidisziplinären Verbundprojektes bewältigt werden. Teilprojektpartner sind folgende Institutionen:

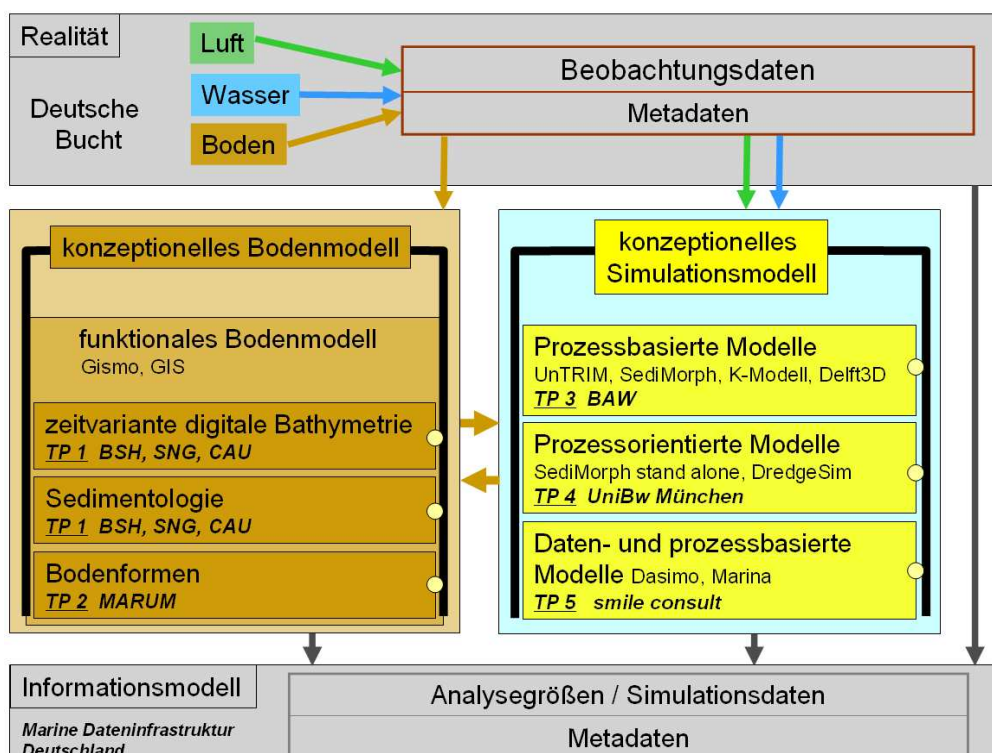
- TP1 Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrografie (BSH) einschließlich der Auftragnehmer Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU), Forschungsinstitut Senckenberg (SNG) und ggf. smile consult GmbH,
- TP2 Universität Bremen (UB),
- TP3 Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) einschließlich des Auftragnehmers Universität Siegen,
- TP4 Universität der Bundeswehr München (UBM) und der
- TP5 smile consult GmbH

## 2 Untersuchungsmethoden

Unverzichtbare Grundlage der gesamten Untersuchungen ist der Aufbau eines umfassenden Bodenmodells, das plausibilisierte, konsistente Daten für Bathymetrie, Bodenformen und Sedimentologie 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 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.

Das thematische Zusammenwirken der verschiedenen Teilprojekte wird durch das folgende Schema deutlich:



### **3 Ergebnisse**

Die im Projekt AufMod erstellten 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 zukünftige Forschungsprojekt: Meeres-Daten-Informationssystem für Deutschland (MDI-DE) in das dieses Verbundprojekt eingebunden ist.

### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2009: Start des Projektes im November – Aufbau und Abstimmung der einzelnen Konzepte.

2010: Aufbau der Systematik des Bodenmodells sowie in-situ-Messungen. Erstellung und Kalibrierung der Modellierungssysteme.

2011: Durchführung von Naturmessungen. Zusammenstellung und Analyse der konsistenten Sediment- und Tiefendaten in das Bodenmodell. Betrieb und Vergleich der Modellsimulationen untereinander. Kalibrierung und Verbesserung der Modellierungssysteme mit Hilfe der Analysen aus dem Bodenmodell (Sediment und Bathymetrie).

2012: Weitergehende Analyse und Dokumentation des Bodenmodells. Abschließende Simulationen durch die unterschiedlichen Modellierungssysteme und Dokumentation.  
Aufbereitung der sedimentologischen und bathymetrischen Daten in Kombination von Boden- und Simulationsmodellierung für das Informationssystem (NOKIS / MDI-DE).  
Erstellung eines abgestimmten Abschlussberichtes für jedes Teilprojekt sowie für das Verbundprojekt.

Bearbeitungszeitraum: bis Ende 2012.

## **KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt**

**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. Norbert Winkel, Dr. Elisabeth Rudolph, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme II (K3)

**E-Mail:** norbert.winkel@baw.de, 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 jedoch 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 BMVBS die Folgen des Klimawandels für Wasserstraßen und für die Schifffahrt und entwickelt entsprechende Anpassungsstrategien. 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. Der Forschungsverbund wird die Bundesregierung beraten und Beiträge für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel leisten.

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 Herausforderungen dar für Betrieb, Unterhaltung und Ausbau der Seeschifffahrtsstraßen, z.B. über Zunahme der Strömungen, große unerwünschte Sedimentumlagerungen oder veränderte nautische Zugangsbedingungen zu den Häfen. Denkbare Anpassungsmaßnahmen umfassen beispielsweise neue Unterhaltungsstrategien (Sedimentmanagement, Bewirtschaftung von Oberwassermengen) oder neu konzipierte Strombauwerke (z.B. zur Sicherung der Fahrrinnen, zur Minimierung von Unterhaltungskosten oder zur Vermeidung zukünftig ungünstiger morphologischer Entwicklungen). Um die Bandbreite von möglichen Klimaänderungen in den geplanten Untersuchungen abzubilden, ist die Modellierung der möglichen zukünftigen Zustände als Sensitivitätsstudie angelegt. Dies ermöglicht es auch, neue Erkenntnisse aus der Klimamodellierung zu berücksichtigen.

#### **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

Das Bearbeitungskonzept ist Bild 1 dargestellt. Im ersten Schritt (**grün**) wird ein Vergleichsdatensatz unter Berücksichtigung der gegenwärtig herrschenden klimatischen Situation für mittlere Verhältnisse und Extremereignisse erzeugt. Zur Abbildung der baroklinen Prozesse werden Salz- und Schwebstofftransport in den Simulationen berücksichtigt. Durch eine gemeinsame Modellierung von Hydrodynamik und Sedimenttransport mit einem Modellsystem kann die Homogenität der Datensätze gewährleistet werden.

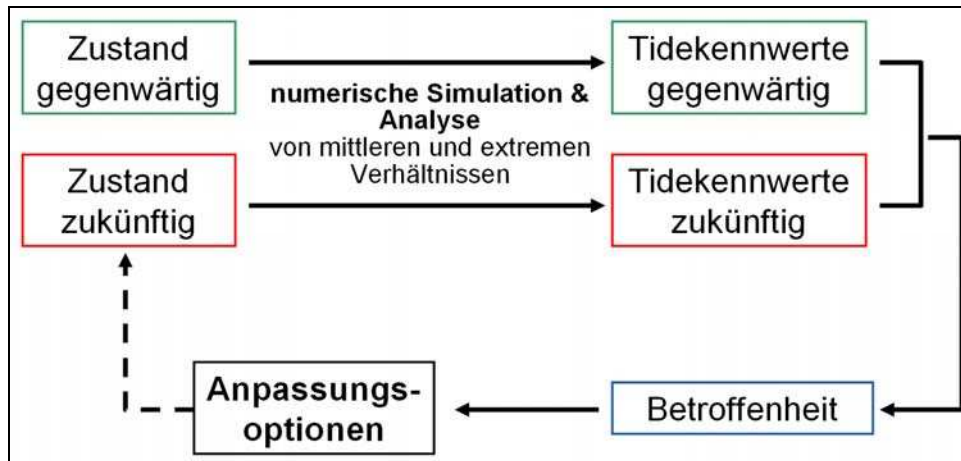


Bild 1: Das Bearbeitungskonzept

Im zweiten Schritt werden dann die im ersten Schritt berücksichtigten gegenwärtigen Verhältnisse mit den durch den Klimawandel geprägten Verhältnissen ausgetauscht (**rot**). Die durch den Klimawandel geprägten Verhältnisse werden dabei über eine Matrix für jedes System bearbeitet. Die Matrix spannt die Bandbreite der möglichen zukünftigen Randbedingungen für das jeweilige System auf (z.B. über mögliche Änderungen im Meeresspiegel, Windstärke und -richtung, Oberwasserzufluss, Topographie). Die Kombination unterschiedlicher zukünftiger Randbedingungen führt auf eine Vielzahl von möglichen zukünftigen Zuständen, die dann in Form von Sensitivitätsstudien analysiert werden. So können die Spannbreite der Ergebnisse und Unsicherheiten aufgezeigt werden. Für die Sensitivitätsstudien werden hoch aufgelöste, 3-dimensionale Modelle von Nord- und Ostsee sowie der Ästuarare eingesetzt (Verfahren UnTRIM2004 und UnTRIM2007 von [2], [3], [1]) und eine standardisierte Analyse der tideabhängigen und -unabhängigen Kennwerte durchgeführt.

Aus einem Vergleich der heutigen Verhältnisse und den möglichen zukünftigen Zuständen kann die Veränderung als Folge eines Klimawandels für mittlere Verhältnisse und für Extremwetterlagen abgeleitet und Anpassungsoptionen entwickelt werden. Die Anpassungsoption wird schließlich ebenfalls als möglicher zukünftiger Zustand berücksichtigt und ihre Wirksamkeit im Modell geprüft (s. Bild 1).

Das Konzept wird auf Nord- und Ostsee sowie auf die Nordseeästuarare Ems und Jade-Weser sowie an der Elbe im Rahmen von KLIMZUG-Nord angewendet.

## 3 Ergebnisse

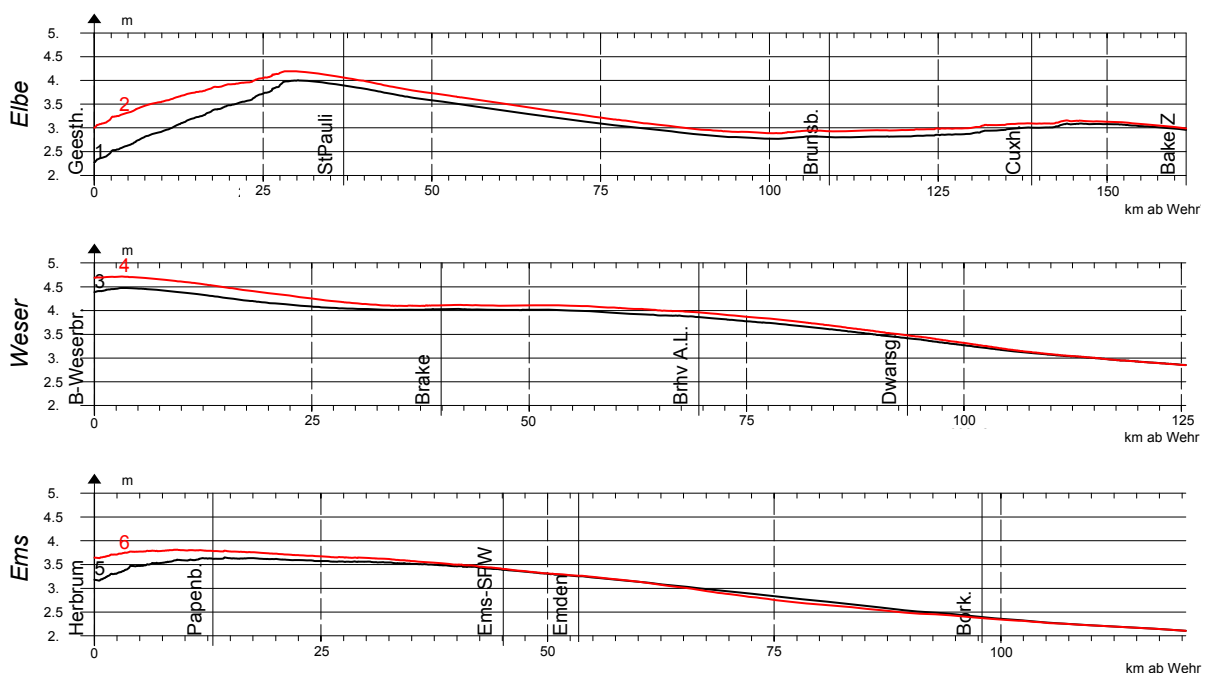
Um sowohl den Datenaustausch innerhalb des Projektes zu testen, als auch die Projektpartner mit den Untersuchungsergebnissen der BAW vertraut zu machen, ist ein Testdatensatz nach dem oben dargestellte Konzept erstellt worden. Hierfür ist in einem *Experiment* der Einfluss eines möglichen mittleren Meeresspiegelanstiegs auf die hydrodynamischen Verhältnisse in der Elbe untersucht worden. Die Untersuchung umfasst vier Schritte:

1. Erstellung eines Referenzdatensatz für heutige mittlere Verhältnisse (Vergleichszeitraum),
2. *Experiment*: Simulation eines Meeresspiegelanstiegs durch Anheben des Tidemittelwassers um 80 cm am seeseitigen Rand,

3. Tidekennwertanalyse der Simulationsergebnisse,
4. Vergleich von Referenzdatensatz und Systemstudie sowie Identifikation der Veränderungen und Ableitung möglicher Betroffenheiten.

Der in diesem *Experiment* untersuchte Einfluss eines Meeresspiegelanstiegs (Anheben des Tidemitelwassers um +80 cm) auf die Verhältnisse in der Tideelbe stellt nur eine sehr grobe Vereinfachung einer möglichen Folge des Klimawandels dar; denn ein Meeresspiegelanstieg wird auch die Gezeitendynamik in der Nordsee beeinflussen. Dieser Einfluss führt dazu, dass die Wasserstände im Elbmündungsgebiet eben nicht linear um einen Wert wie im *Experiment* verändert werden. Um diesen Einfluss zu berücksichtigen, sollen zukünftig die seeseitigen Randwerte für Tideelbe mit einem Nordseemodell berechnet werden.

Der Vergleich der Ergebnisse der Systemstudien ist in Bild 2 dargestellt. Es zeigt sich, dass sich aufgrund des erhöhten Mittelwassers am seeseitigen Rand ähnliche Änderungen der hydrodynamischen Größen in den drei Ästuaren ergeben: Das Niedrigwasser steigt im Inneren der Ästuarer um weniger als den eingesteuerten Betrag von 80 cm. Das Hochwasser steigt hingegen auch im Inneren der Ästuarer um 80 cm, sodass sich für alle Ästuarer der in Abbildung 2 entlang der Fahrinne dargestellte Anstieg des Tidenhubs ergibt. Eine Ausnahme bildet die Ems, die kleinräumig eine Abnahme des Tidenhubs aufweist.



**Bild 2:** Mittlerer Tidehub in Metern für den Ist-Zustand in Schwarz und in Rot für das Experiment – für Elbe, Weser und Ems

Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass die Strömungsgeschwindigkeiten in den meisten Abschnitten der drei Ästuarer steigen. Dabei erhöhen sich die Flutstromgeschwindigkeiten stärker als die Ebbestromgeschwindigkeiten. Eine auffallende Ausnahme bildet die Unterems. Hier zeigen die Ergebnisse eine Stärkung des Ebbestroms gegenüber dem Flutstrom. Des Weiteren dringt in allen drei Ästuarer bei einer Erhöhung des Mittelwassers am seeseitigen Rand salzhaltigeres Wasser weiter landeinwärts.



#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2010: Definition und Modellierung des Vergleichszustandes  
2010/11/12: Definition und Modellierung der Szenarien unter Klimaänderungsbedingungen  
2012/13: Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen und Modellierung der Wirksamkeit der Anpassungsmaßnahmen  
Bearbeitungszeitraum: bis Februar 2013.

#### 5 Literatur

- [1] BAW, 2004. Technical Report Mathematical Model UnTRIM – Validation Document. [http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische\\_verfahren/pdf/Simulationsverfahren\\_Kueste\\_validation\\_document-untrim-2004.pdf](http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/Simulationsverfahren_Kueste_validation_document-untrim-2004.pdf)
- [2] CASULLI, V. & WALTERS, R. A. 2000. An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 32: 331-348
- [3] 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

**UnTRIM SubGrid-Topografie****Netzplan-Nr.:** A39550370150**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**

In mathematischen Verfahren, wie z. B. UnTRIM, wird die Genauigkeit, mit der die Topografie eines Modellgebietes dargestellt werden kann, i. W. durch die Auflösung des Gitternetzes bestimmt: je feiner ein Gebiet diskretisiert wird, um so genauer kann die natürliche Topografie in dem ortsspezifischen Modell wiedergegeben werden. Die Diskretisierung bestimmt damit auch die Genauigkeit, mit der z. B. das Tidevolumen zwischen Tidehoch- und Tideniedrigwasser von dem Modell wiedergegeben werden kann. Anders ausgedrückt: Die Genauigkeit, mit der das zu jedem Zeitpunkt in einem Tidegewässer befindliche Wasservolumen wiedergegeben werden kann, hängt entscheidend von der gewählten Gitternetzauflösung ab. Allerdings wächst der Berechnungsaufwand näherungsweise kubisch mit steigender Gitternetzauflösung an: Halbiert man die Gitterweite (doppelte Auflösung), so steigt der Aufwand für die Berechnung um ca. den Faktor 8 an.

Die Verwendung topografischer Informationen auf der Subgrid-Skala (also unterhalb der „klassischen“ Gitternetzauflösung liegend) verspricht eine von der „klassischen“ Auflösung unabhängige Wiedergabe der Topografie. Die Genauigkeit hängt dann nur noch von der Messgenauigkeit und der räumlichen Dichte der benutzten Tiefendaten ab.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Eine möglichst „exakte“ Wiedergabe der natürlichen Tiefenverteilung in einem ortsspezifischen numerischen Modell verbessert dessen Naturähnlichkeit, da für jede Position der Wasseroberfläche das in dem System befindliche Wasservolumen ebenfalls „exakt“ wiedergegeben werden kann. Dies ist entscheidend für eine naturähnliche Wiedergabe der Systemdynamik. Dauer von Tidesieg und Tidefall, Asymmetrie der Tidekurve, Flut- oder Ebbestromdominanz sowie Überflutung und Trockenfallen von Wattgebieten hängen davon wesentlich ab.

Eine möglichst präzise Simulation der vorgenannten Phänomene ist damit auch entscheidende Voraussetzung für eine erfolgreiche Simulation der Transporte von Salz, Wärme und Sedimenten. Die Verwendung subgridskaliger Informationen kann daher die Qualität diesbezüglicher Prognoserechnungen für Fragen des Ausbaus- sowie der laufenden Unterhaltung von Seeschiffahrtsstraßen weiter verbessern helfen, ohne den hierfür notwendigen CPU-Aufwand in nicht ökonomisch vertretbarer Weise ansteigen zu lassen.

**1.3 Untersuchungsziel**

- Erprobung verschiedener Strategien bei der Erzeugung subgridskaliger topografischer Daten:
  - Methode *Topografic Terraces* (TT) – Unterteilung nach Linien gleicher Tiefe;
  - Methode *Sub Division* (SD) – gleichmäßige Unterteilung aller Zellen des Berechnungsgitters;
  - Methode *Height Division* (HD) – Unterteilung nach lokalen Tiefendifferenzen.
- Prinzipbeispiel U-Kanal (stationär) mit Trapezgerinne und seitlichen Vorländern: Einfluss des Gitters (Berechnungsgitter und SubGrid), der
  - Parametrisierung der Bodenreibung und der
  - Turbulenzmodellierung aufdie Berechnungsergebnisse.

- Ortspezifisches Modell der Elbe (instationär) für Ist-Zustand und eine Ausbauvariante (Vertiefung): Einfluss des
  - Gitters (Berechnungsgitter und SubGrid), sowie
  - der Art und Weise der Abbildung der Topografie (im Berechnungsgitter oder als SubGrid) auf die Ergebnisse für den Ist-Zustand sowie die prognostizierten ausbaubedingten Änderungen.
- Bewertung der Eignung des Verfahrens für die praktische Anwendung in der BAW.

## 2 Untersuchungsmethoden

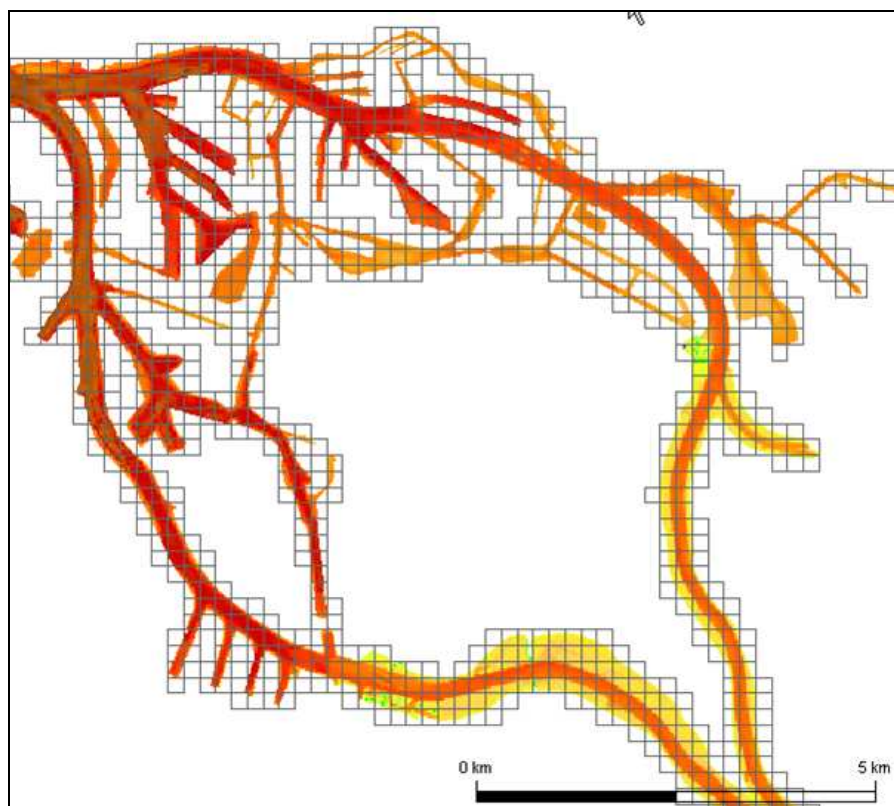
Die Berechnungsgitter mit zusätzlichen SubGrid-Daten werden von der Firma Smile Consult (Hannover) unter Verwendung des speziell hierfür erweiterten Gitternetzgenerators JaNET bereit gestellt.

Für die numerische Simulation steht das von Herrn Prof. Casulli neu entwickelte Simulationsverfahren UnTRIM<sup>2</sup> (sprich UnTRIM-Quadrat; siehe Literatur) sowohl in der BAW als auch bei Smile Consult zur Verfügung.

Die Berechnungsergebnisse werden mit lokalen Methoden weitergehend analysiert und visualisiert.

## 3 Ergebnisse

1. User Interface Beschreibung für UnTRIM<sup>2</sup>.
2. Einbinden von UnTRIM<sup>2</sup> in die BAW-Programmierungsumgebung ProgHome und Erprobung mit klassischen Gitternetzen (ohne SubGrid).
3. Konzeptionelle Entwicklung diverser Strategien für die Erzeugung von SubGrid-Daten.
4. Erprobung der Erzeugung von Gitternetzen mit SubGrid (siehe Bild 1).



*Bild 1: Hamburger Hafen. Berechnungsgitter (grau) mit 200 m Auflösung. Farbiges SubGrid (Topografie) in einer Auflösung von 25 m. Alle Hafenbecken und –kanäle können in dem groben Berechnungsgitter dank SubGrid-Technologie (annähernd) flächen- und volumentreu wiedergegeben werden. Quelle: Smile Consult (Hannover).*

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

1. Erzeugen der Gitternetze für das Prinzipbeispiel U-Kanal (1-12 Berechnungszellen im Querschnitt).
2. Erzeugen der Gitternetze für die Elbe (Ist-Zustand). Strukturiertes Berechnungsgitter mit unterschiedlichen Auflösungen (400, 200, 100 und 50 m). SubGrid mit unterschiedlichen Auflösungen (400, 200, 100, 50, 25, 10 und (falls möglich) 5 m). Unterschiedliche Strategien (TT, SD und HD).
3. Simulationsrechnungen Prinzipbeispiel U-Kanal. Sensitivitätsanalyse Wasserstand.
4. Simulationsrechnungen Elbe (Ist-Zustand). Analyse der Volumina und Flächen für verschiedene Wasserstände. Sensitivitätsanalyse Wasserstand und Durchfluss (auf Querschnitten).
5. Erzeugen der Gitternetze für die Elbe (Variante Vertiefung). Siehe auch Punkt 2.
6. Simulationsrechnungen Elbe (Variante Vertiefung). Sensitivitätsanalyse prognostizierte Änderung des Wasserstands (Thw, Tnw und Thb).
7. Bewertung der Eignung der SubGrid-Technologie für Fragestellungen der BAW.
8. Konzeptentwurf: Anforderungen an eine vollständige Integration der SubGrid-Technologie in das Postprocessing der BAW.
9. Anforderungsanalyse: Erweiterung der Simulationspakete für Seegang (K-Modell), Morphologie (SediMorph), etc. für SubGrid-Technologie.

Die Schritte 1 bis 7 sollen bis Ende 2011 (Ende dieses FuE-Projekts) abgeschlossen werden. In Abhängigkeit vom Ergebnis hinsichtlich der Eignung der SubGrid-Technologie für Ziele der BAW, müssten die zur Realisierung der Punkte 8 und 9 erforderlichen Arbeiten, falls diese hinsichtlich ihres zeitlichen Aufwands erheblich sein sollten, in separaten Nachfolge-Projekten bearbeitet werden.

#### 5 Literatur

- [1] Casulli, Vincenzo (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.

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

**Netzplan-Nr.:** A39550370163

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

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

### **1 Problemstellung und Ziel**

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

Die Tideelbe gehört zu den wichtigsten europäischen Schifffahrtsstraßen. Die Folgen des Klimawandels können die Schifffahrt, den Zustand der Wasserstraße und die angrenzenden Lebensräume verändern. Die möglichen Betroffenheiten werden hauptsächlich durch einen Anstieg des Meeresspiegels, veränderte Sturmtätigkeiten und ein verändertes Abflussregime beeinflusst. Die BAW untersucht im Rahmen des Projektes die Folgen des Klimawandels für die Wasserstraße und Schifffahrt und entwickelt in Kooperation mit den Betroffenen entsprechende Anpassungsstrategien. Ziel ist es einerseits, die Leistungsfähigkeit des Verkehrsträgers zu sichern, und andererseits, die Gewässerqualität und Lebensräume der Tideelbe zu gewährleisten. Die Ergebnisse des Projektes fließen in einen Masterplan, den die Metropolregion Hamburg handlungsfähig für die Herausforderungen des Klimawandels machen soll.

Bedingt durch die geographische Lage werden die Verhältnisse in der Tideelbe durch die Gezeiten, den Oberwasserzufluss und den Wind geprägt. Die Tideelbe wird daher auch von den Folgen des Klimawandels betroffen sein. Durch einen Meeresspiegelanstieg oder die Veränderung der Wind- und Niederschlagsverhältnisse werden Extremereignisse wie Sturmfluten oder schleichende Prozesse wie die Verschlickung von Hafengebieten, die Erosion von Wattflächen oder die Salzintrusion beeinflusst. Um mögliche Systemreaktionen auf den Klimawandel abschätzen und Anpassungsoptionen für die betroffenen Sektoren entwickeln zu können, wird im Projekt KLIMZUG-Nord ein integrativer Ansatz verfolgt, der alle Interessensgruppen der Metropolregion einschließt. Denkbare Anpassungsmaßnahmen umfassen beispielsweise neue Unterhaltungsstrategien (Sedimentmanagement, Bewirtschaftung von Oberwassermengen) oder neu konzipierte Strombauwerke (z.B. zur Sicherung der Fahrrinnen, zur Minimierung von Unterhaltungskosten oder zur Vermeidung zukünftig ungünstiger morphologischer Entwicklungen). Um die Bandbreite von möglichen Klimaänderungen in den geplanten Untersuchungen abzubilden, ist die Modellierung der möglichen zukünftigen Zustände als Sensitivitätsstudie angelegt. Dies ermöglicht es, jederzeit neue Erkenntnisse aus der Klimamodellierung zu berücksichtigen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die hydromorphologische Entwicklung als Systemreaktion der Tideelbe auf den Klimawandel stellt in diesem Projekt eine große Herausforderung dar. Zur langfristigen Gewährleistung der Schifffahrt, des Küstenschutzes und der Funktionalität des natürlichen Lebensraums ist die Abschätzung der Systemreaktion der Tideelbe eine notwendige Grundlage. Aufbauend auf dem im Projekt geschaffenen Systemverständnis können sinnvolle Anpassungsoptionen und -strategien entwickelt, auf ihre Effektivität getestet und ggf. optimiert werden. Außerdem wird ein Netzwerk aus Interessensgruppen und Experten aller betroffenen Sektoren entstehen. Sowohl der Methodenkatalog für Anpassungsoptionen als auch die geschaffene Infrastruktur soll die WSV bei einer nachhaltigen Gewässerbewirtschaftung unter veränderten Klimabedingungen unterstützen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Aufbauend auf Simulationen der GKSS zum Wasserstand, Seegang und Salzgehalt der Nordsee wird die BAW die Klimafolgenmodellierung für die Tideelbe durchführen. Die Sensitivitätsstudien folgen dem Konzept der Projekte im Programm KLIWAS (s. Punkt 3) Wenn die Auswirkungen der Klimafolgenzenarien auf die Tide- und Transportdynamik nach Abschluss der Simulationen vorliegen, werden auf dieser Grundlage Anpassungsmaßnahmen in ihrer Effektivität dargestellt. Die Auswahl der zu

simulierenden Sensitivitätsstudien und Anpassungsmaßnahmen wird in Abstimmung mit der HPA und betroffenen Teilprojekten erfolgen.

Untersuchungsziele im Detail:

1. Thematische Einarbeitung
2. Erstellung eines Testdatensatzes für Nutzer der BAW-Daten/Projektpartner
3. Modellierung des heutigen Zustandes (typische und extreme Verhältnisse)
4. Definition und Auswahl von Sensitivitätsstudien in Kooperation mit Projektpartnern
5. Modellierung der Sensitivitätsstudien und Auswertung
6. Entwicklung, Testen und Optimierung von Anpassungsoptionen in Kooperation mit Projektpartnern inkl. Wdh. der Unterpunkte 4 und 5

## 2 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungsmethoden folgen dem Bearbeitungskonzept der BAW-Projekte im Programm KLIWAS, Bild 1. Im ersten Schritt (grün) wird ein Vergleichsdatensatz unter Berücksichtigung der gegenwärtig herrschenden klimatischen Situation für mittlere Verhältnisse und Extremereignisse erzeugt. Zur Abbildung der baroklinen Prozesse werden Salz- und Schwebstofftransport in den Simulationen berücksichtigt. Durch eine gemeinsame Modellierung von Hydrodynamik und Sedimenttransport mit einem Modellsystem kann die Homogenität der Datensätze gewährleistet werden.

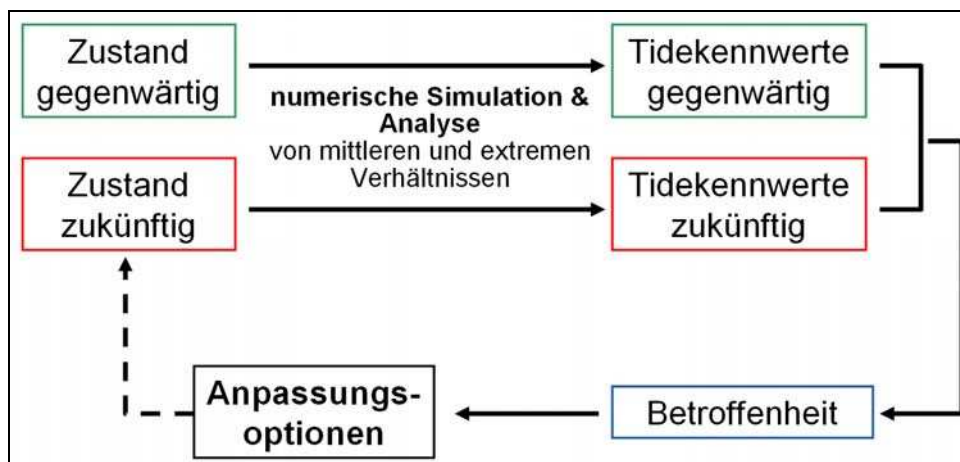


Bild 1: Das Bearbeitungskonzept

Im zweiten Schritt werden dann die im ersten Schritt berücksichtigten gegenwärtigen Verhältnisse mit den durch den Klimawandel geprägten Verhältnissen ausgetauscht (rot). Die durch den Klimawandel geprägten Verhältnisse werden dabei über eine Matrix bearbeitet. Die Matrix spannt die Bandbreite der möglichen zukünftigen Randbedingungen in der Tideelbe auf (z.B. über mögliche Änderungen im Meeresspiegel, Windstärke und -richtung, Oberwasserzufluss, Topographie). Die Kombination unterschiedlicher zukünftiger Randbedingungen führt auf eine Vielzahl von möglichen zukünftigen Zuständen, die dann in Form von Sensitivitätsstudien analysiert werden. So können die Spannweite der Ergebnisse und Unsicherheiten aufgezeigt werden. Für die Sensitivitätsstudien wird ein hoch aufgelöstes, 3-dimensionales Modell eingesetzt (Verfahren UnTRIM2004 und UnTRIM2007 von [2], [3], [1]) und eine standardisierte Analyse der tideabhängigen und –unabhängigen Kennwerte durchgeführt.

Aus einem Vergleich der heutigen Verhältnisse und den möglichen zukünftigen Zuständen kann die Veränderung als Folge eines Klimawandels für mittlere Verhältnisse und für Extremwetterlagen abgeleitet und Anpassungsoptionen entwickelt werden. Die Anpassungsoption wird schließlich ebenfalls als möglicher zukünftiger Zustand berücksichtigt und ihre Wirksamkeit im Modell geprüft (s. Bild 1).

### 3 Ergebnisse

Um sowohl den Datenaustausch innerhalb des Projektes zu testen, als auch die Projektpartner mit den Untersuchungsergebnissen der BAW vertraut zu machen, ist ein Testdatensatz nach dem oben dargestellte Konzept erstellt worden. Hierfür ist in einem *Experiment* der Einfluss eines möglichen mittleren Meeresspiegelanstiegs auf die hydrodynamischen Verhältnisse in der Elbe untersucht worden. Die Untersuchung umfasst vier Schritte:

1. Erstellung eines Referenzdatensatz für heutige mittlere Verhältnisse (Vergleichszeitraum),
2. *Experiment*: Simulation eines Meeresspiegelanstieges durch Anheben des Tidemittelwassers um 80 cm am seeseitigen Rand,
3. Tidekennwertanalyse der Simulationsergebnisse,
4. Vergleich von Referenzdatensatz und Systemstudie sowie Identifikation der Veränderungen und Ableitung möglicher Betroffenheiten.

Der in diesem *Experiment* untersuchte Einfluss eines Meeresspiegelanstiegs (Anheben des Tidemittelwassers um +80 cm) auf die Verhältnisse in der Tideelbe stellt nur eine sehr grobe Vereinfachung einer möglichen Folge des Klimawandels dar; denn ein Meeresspiegelanstieg wird auch die Gezeitendynamik in der Nordsee beeinflussen. Dieser Einfluss führt dazu, dass die Wasserstände im Elbmündungsgebiet eben nicht linear um einen Wert wie im *Experiment* verändert werden. Um diesen Einfluss zu berücksichtigen, sollen zukünftig die seeseitigen Randwerte für Tideelbe mit einem Nordseemodell berechnet werden.

Der Vergleich der Ergebnisse der Systemstudien ist in Bild 2 und Bild 3 dargestellt. Bild 2 zeigt den Tidehub für den Ist-Zustand (schwarz) und das Experiment (rot) entlang der Fahrtrasse. Es stellt sich heraus, dass aufgrund des erhöhten Mittelwassers am seeseitigen Rand der Tidehub zunimmt, und zwar binnenseitig stärker als seeseitig. Bild 3 zeigt den Salzgehalt entlang für den Ist-Zustand (schwarz) und das Experiment (rot) entlang der Fahrtrasse. Es wird deutlich, dass bei erhöhtem Mittelwasser die Salzwasserfront landeinwärts dringt.

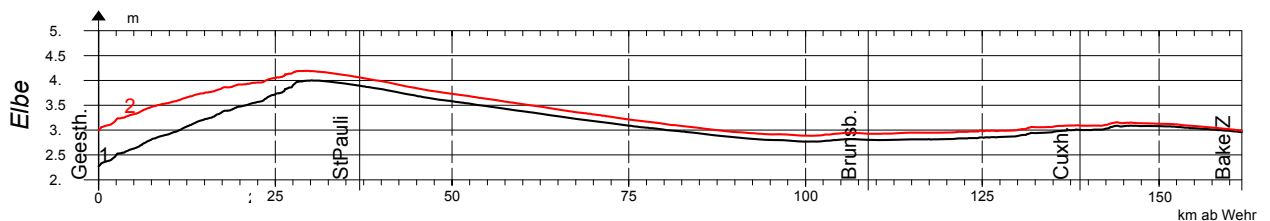


Bild 2: Mittlerer Tidehub in Metern für den Ist-Zustand in Schwarz und in Rot für das Experiment

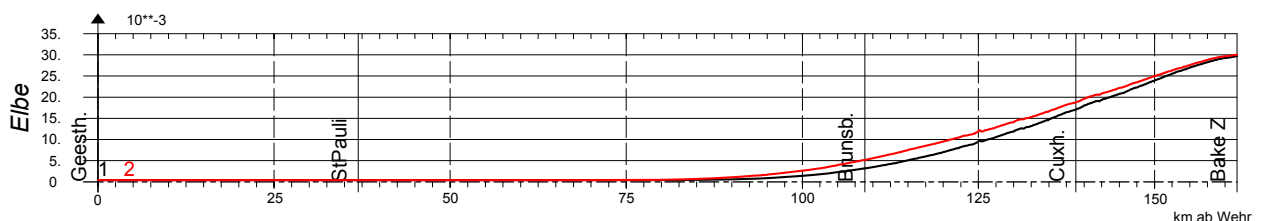


Bild 3: Mittlerer Salzgehalt für den Ist-Zustand in Schwarz und in Rot für das Experiment

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2010: Unterpunkte 2, 3, 4 und 5 aus 1.3

2011: Unterpunkte 3, 4, 5 aus 1.3

2012/13: Unterpunkt 6 aus 1.3

Bearbeitungszeitraum: bis März 2013

## 5 Literatur

- [1] BAW, 2004. Technical Report Mathematical Model UnTRIM – Validation Document. [http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische\\_verfahren/pdf/Simulationsverfahren\\_Kueste\\_validation\\_document-untrim-2004.pdf](http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/Simulationsverfahren_Kueste_validation_document-untrim-2004.pdf)
- [2] CASULLI, V. & WALTERS, R. A. 2000. An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 32: 331-348
- [3] 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



## **XtremRisk: Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten -- Risikoermittlung und -beherrschung im Klimawandel**

**Netzplan-Nr.:** A39550370165

**Projektleiterin:** Dr. rer. nat. E. Rudolph, Abteilung Wasserbau in Küstenbereich, Referat Ästuar-systeme II (K3)

**E-Mail:** elisabeth.rudolph@baw.de

**Internet:** <http://www.xtremrisk.de/>

### **1 Problemstellung und Ziel**

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

Neben dem Anstieg des mittleren Meeresspiegels können auch häufigere oder verstärkte Sturmfluten zu den möglichen Folgen des Klimawandels in Küsten- und Ästuargebieten gehören. Angesichts des sehr langsamen Meeresspiegelanstiegs und der besseren Möglichkeiten zur Anpassung besteht die dringlichste Aufgabe darin, die Folgen der Zunahme extremer Sturmfluten hinsichtlich der Häufigkeit, Intensität und Verweildauer für den Hochwasser- und Küstenschutz abzuschätzen, um mögliche Katastrophen abzuwenden. Die Dringlichkeit, den lokalen Folgen des globalen Klimawandels in Form von veränderten Sturmflutverhältnissen vorausschauend und präventiv zu begegnen, ergibt sich unmittelbar daraus, dass Küsten- und Ästuargebiete weltweit als bevorzugte Siedlungs- und Wirtschaftsräume sowie als Räume wertvollster Ökosysteme unseres Planeten darstellen und daher als vorrangig gefährdet gelten.

An diesem BMBF Verbundprojekt sind das Leichtweiß - Institut für Wasserbau der TU Braunschweig (LWI), das Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) an der Universität Siegen, der Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (LSBG) Hamburg und die TU Hamburg Harburg beteiligt. Die BAW ist Partner im Teilprojekt 1: Extreme Sturmfluten (Risikoquellen). Eine ausführliche Beschreibung des Projektes findet man unter <http://www.xtremrisk.de/>.

Im Teilprojekt 1 wird unter den derzeitigen Bedingungen und bei Klimaänderungen untersucht, welche Extremwerte der einzelnen Sturmflutkomponenten physikalisch möglich sind und welche physikalisch sinnvollen Kombinationen zu Sturmflutverläufen führen, bei deren Auftreten die untersuchten Standorte Hamburg und Sylt vulnerabel werden, d. h. bei welchen Sturmflutverläufen katastrophale Schäden zu erwarten sind. Die bestehenden Unsicherheiten sollen dabei explizit berücksichtigt werden. Daher ist ein probabilistisches Vorgehen unverzichtbar. Die Ergebnisse werden entsprechend als Eingaben für die Teilprojekte 2-4 aufbereitet.

Die im Verbundprojekt XtremRisk beteiligten Projektpartner benötigen für das Projekt zuverlässige Simulationen für extreme Sturmflutszenarien in der Tideelbe. Für die BAW ist die Simulation und Analyse von Sturmfluten im Bereich der Seeschiffahrtsstraßen eine Kernaufgabe. Die Methoden und Verfahren liegen im Grundsatz vor und werden jedoch noch an die projektbezogenen Anforderungen angepasst.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die BAW führt im Rahmen von Untersuchungen zu z. B. Fahrrinnenanpassungen Simulationen und Analysen von Sturmfluten im Bereich der Seeschiffahrtsstraßen durch. Erkenntnisse aus dem Projekt XtremRisk werden der WSV helfen die Bundeswasserstrassen auf die möglichen Folgen des Klimawandels bei Extremereignissen wie Sturmfluten vorzubereiten.

### 1.3 Untersuchungsziel

Im Rahmen von XtremRisk wird vom Projektpartner LSBG extrem hohe Sturmfluten synthetisch zusammengesetzt und ein Wasserstandsverlauf für den Elbmündungsbereich bei Cuxhaven entwickelt. Für diese synthetischen Sturmflutszenarien wird von der BAW auf der Grundlage der numerischen Modellierung der Wasserstandsverlauf entlang der Elbe bestimmt. Diese Sturmflutwasserstände sind dann die Eingangsgrößen für weitere Untersuchungen der beteiligten Projektpartner.

### 2 Untersuchungsmethoden

Mit empirischen Methoden werden vom LSBG mögliche extreme Wasserstandsverläufe bei Sturmflut für Cuxhaven in der Elbmündung entwickelt. Durch die Vorgabe dieser Wasserstandsverläufe, der dazugehörigen Windentwicklung über der Elbe sowie der Vorgabe des Oberwasserzuflusses in die Elbe können im Anschluss bei der BAW diese synthetischen Sturmflutszenarien in der Elbe modelliert werden. Hierzu wird das hydrodynamische numerische Modell UnTRIM2004 ([3], [2]) eingesetzt. Im Anschluss kann sowohl der zeitliche Verlauf des Wasserstandes an Orten von Interesse als auch die Analyseergebnisse Sturmflutscheitelwasserstand HW, Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes tHW und Dauer hoher Wasserstände DHW (<http://www.baw.de/methoden/index.php5/LZKWF>) an die Projektpartner weitergegeben werden. Zur Einordnung der Ergebnisse werden ergänzend Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt. Hierfür wird z.B. der Einfluss der Salzgehaltsverteilung im Ästuar auf die Sturmflutscheitelwasserstände betrachtet. Mit den Wasserstandszeitreihen aus dem Elbe – Modell der BAW betreibt anschließend der Projektpartner TU Harburg Ausschnittmodelle der Elbe. Der Sturmflutscheitelwasserstand wird von LSBG und fwu für die statistische Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit dieser synthetischen Sturmflut benötigt.

### 3 Ergebnisse

Für das erste zu untersuchende Sturmflutszenario (X1S30) wurde vom LSBG ein Wasserstandsverlauf bei Cuxhaven mit einem Sturmflutscheitelwasserstand von NN + 6,10 m (zum Vergleich HThw = NN + 5,10 m in Cuxhaven am 3. Januar 1976) vorgeben. Der Windverlauf über dem Elbeästuar entspricht dem Verlauf während der Sturmflut vom 3. Januar 1976. Die Windfelder für diesen Zeitraum wurden vom DWD mit MKW (Schmidt, H. und J. Pätch, 1992) modelliert. Der Oberwasserzufluss in das Elbeästuar wird mit  $Q = 3600 \text{ m}^3/\text{s}$  (zum Vergleich HHQ =  $3620 \text{ m}^3/\text{s}$ ) vorgegeben. Am Rand zur Nordsee wird ein Salzgehalt von 30 PSU angenommen. Im Rahmen einer Sensitivitätsuntersuchung zum Einfluss der Salzgehaltsanfangsverteilung auf die Sturmflutscheitelwasserstände wird zusätzlich das Szenario X1S25 mit einem Salzgehalt von 25 PSU am Rand zur Nordsee betrachtet. Bild 1 zeigt die Sturmflutscheitelwasserstände dieser Szenarien. Für das Szenario X1S30 wird in Hamburg St. Pauli ein Wasserstand von NN + 8,00 m erreicht. Die Variation des Salzgehaltes im Mündungsbereich verändert den Sturmflutscheitelwasserstand bei Hamburg St. Pauli um weniger als 5 cm.

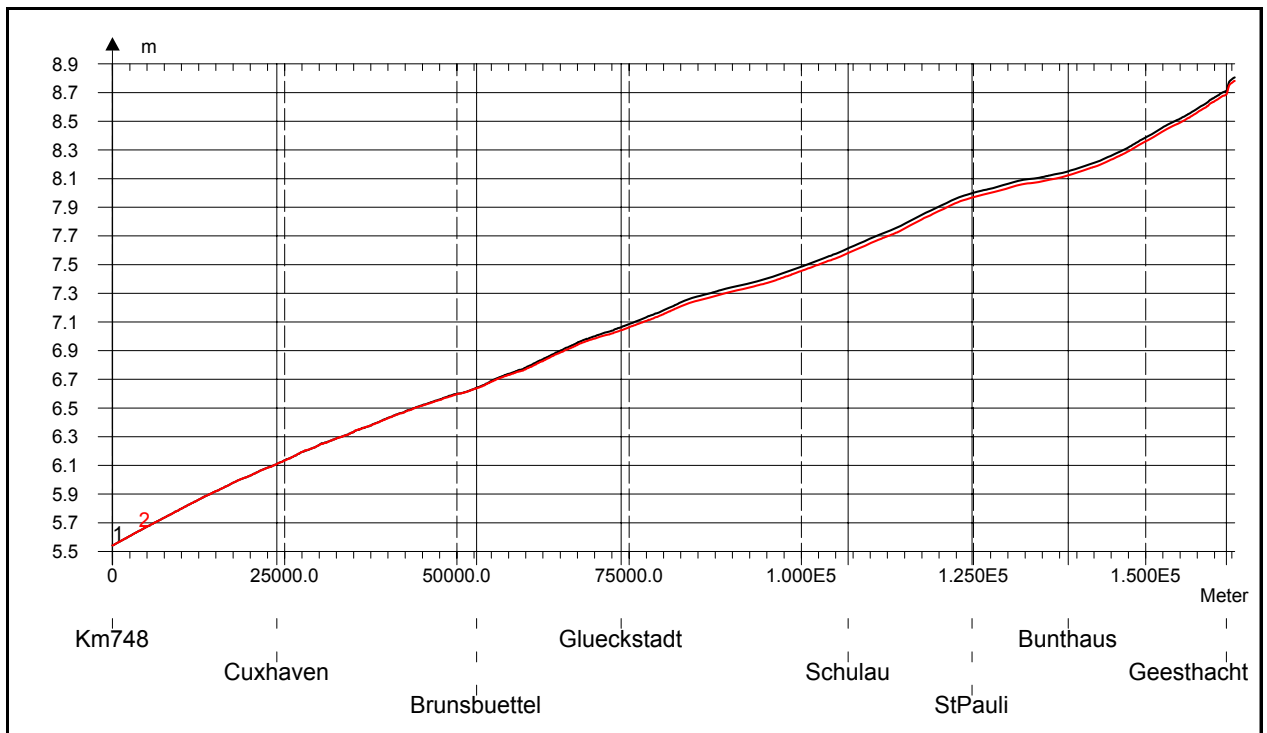


Bild 1: Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Elbe zwischen der Elbmündung bei Cuxhaven und dem Wehr Geesthacht für das Sturmflutszenario X1S30 (1;schwarz). Das Ergebnis der Sensitivitätsuntersuchung Salzgehalt X1S25 ist in Rot (2) dargestellt.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Im Rahmen von XtremRisk wird die BAW insgesamt vier extreme Sturmflutszenarien modellieren und die Modellergebnisse analysieren. Die Wasserstandsentwicklung im Bereich der Elbmündung bei Cuxhaven wird im XtremRisk Teilprojekt 1 vom LSBG empirisch entwickelt. Es ist vorgesehen, dass diese weiteren Sturmflutszenarien Ende 2010 bzw. Anfang 2011 untersucht werden. Damit wird sichergestellt, dass die Projektpartner die Ergebnisse der numerischen Modellierung in den jeweiligen Teilprojekten berücksichtigen können.

Bearbeitungszeitraum XtremRisk: 1. April 2009 bis 1. April 2012.

#### 5 Literatur

- [1] BAW (2002). Tideunabhängige Kennwerte des Wasserstandes. Bericht. Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157. 22559 Hamburg.  
[http://www.baw.de/methoden/index.php5/Tideunabh%C3%A4ngige\\_Kennwerte\\_des\\_Wasserstands](http://www.baw.de/methoden/index.php5/Tideunabh%C3%A4ngige_Kennwerte_des_Wasserstands)
- [2] BAW (2004). Validation document – Mathematical – Model UnTRIM. Bericht. Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157. 22559 Hamburg.  
[http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische\\_verfahren/pdf/vd-untrim-2004.pdf](http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/vd-untrim-2004.pdf)
- [3] Casulli, V. und Walters, R. A. (2000). An unstructured, three dimensional model based on the shallow water equations. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 32. S. 331 – 348.
- [4] DGJ (2008). Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Elbegebiet, Teil III, Untere Elbe ab der Havelmündung, Abflussjahr 2004. Freie und Hansestadt Hamburg – Hamburg Port Authority A-öR.
- [5] Schmidt, H. und Pätsch, J. (1992). Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen. Die Küste, 54, S. 131 - 142.